Journal of Agroecology
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

Research Article
Vol. 15, No. 1, Spring 2023, p. 89-118

Application of Arbuscular Mycorrhizal Fungus (*Rhizophagus intraradices*) and Nitrogen Fertilizer under Different Irrigation Regimes on Quantity and Quality Characteristics of Peppermint (*Mentha piperita* L.)

Abdollah Javanmard[1*], Ali Ostadi[2] and Mostafa Amani Machiani[2]

Received: 07-04-2021
Revised: 15-08-2021
Accepted: 31-08-2021
Available Online: 31-08-2021

How to cite this article:
Javanmard, A., Ostadi, A., & Amani Machiani, M. (2023). Application of arbuscular mycorrhizal fungus (*Rhizophagus intraradices*) and nitrogen fertilizer under different irrigation regimes on quantity and quality characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Journal of Agroecology*. *15*(1), 89-118.
DOI: 10.22067/agry.2021.69643.1034

Introduction

Water deficit or drought stress is one of the critical abiotic stresses and limiting factors in the productivity of plants, especially in arid and semi-arid regions. In these conditions, the nutrient use efficiency by plant decrease due to the lower mobility of these elements. The application of bio-fertilizers is one of the most important and sustainable strategies for soil fertility management and plant nutrition; in addition to reducing chemical pollution, improves plant growth conditions. The application of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), as bio-fertilizer improves plant nutrients and water uptake and enhances plant resistance to stress conditions leading to improving plant growth and productivity. The objectives were evaluating the effect of different fertilizer sources (chemical fertilizer and AMF as biofertilizer) and harvesting time on the quantity and quality characteristics of peppermint under drought-stress conditions.

Materials and Methods

To evaluate the effects of different fertilizer sources and harvesting times on the quantity and quality of essential oil in peppermint (Mentha piperita L.) under drought stress conditions, a field experiment was carried out at the Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran, in 2019. The study followed a split-split plot design based on a randomized complete block design (RCBD) with 36 treatments and three replications. The first factor included three irrigation levels: irrigation after depletion of 30% available water as control, depletion of 50% of available water as mild stress, and depletion of 70% of available water as severe stress. The sub-factor included different fertilizer sources, including control (C), 100% nitrogen fertilizer (NF), arbuscular mycorrhizal fungi (Rhizophagus intraradices) (AMF), 75% NF + AMF, 50% NF + AMF, and 25% NF + AMF. The third factor was harvesting time (first and second harvest). The distance between rows was set to be 4 m, with a plant density of 10 plants per m2. In AM fungi treatments, 80 g of the soil containing mycorrhizal fungi hyphae and the remains of the root and spores (1000 g spore.10-1 g soil) was added to the soil during planting. The aerial parts of peppermint were harvested at 50% flowering stage on the first and second harvests. The data were analyzed using analysis of variance and mean comparison based on the least significant difference (LSD) test with SAS 9.3 statistical software.

1- Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Iran.
2- Assistant Professor, Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran.
(*- Corresponding author's Email: a.javanmard@maragheh.ac.ir)

Results and Discussion

The results showed that plant height, number of nodes per plant, number of leaves per plant, number of lateral branches per plant, SPAD index, dry matter yield, essential oil content, and yield were significantly affected by the interaction of fertilizer sources x irrigation levels, harvesting time, and harvesting time x irrigation levels. The highest and lowest values of morphological characteristics, leaf greenness, dry matter yield, and essential oil yield of peppermint were achieved under non-stress conditions with the application of 75% nitrogen fertilizer + AMF and severe water stress without fertilization, respectively. The maximum (2.4%) and minimum (1.2%) of essential oil content were observed under mild water stress fertilized with 75% nitrogen fertilizer + AMF and severe water stress without fertilization, respectively. The main essential oil compounds were menthol, menthone, 1,8 cineol, and menthofuran. The highest menthol and menthone content were recorded under mild water stress fertilized with 75% nitrogen fertilizer + AMF and non-stress conditions fertilized with 25% nitrogen fertilizer + AMF. The first harvest showed higher values of morphological characteristics, dry matter yield, essential oil content, and yield compared to the second harvest due to the longer growth period and better growth conditions in the first harvest.

Conclusions

The results demonstrated that the plant height, the number of nods per plant, number of leaves per plant, the number of lateral branches per plant, SPAD index, dry matter yield and essential oil yield decreased significantly with increasing stress levels. In contrast, the application of AMF reduced the adverse effects of water stress, so that in severe water stress conditions (irrigation after depletion of 70% available water), individual and integrative application of AMF with nitrogen fertilizer increased the mentioned traits when compared with control. In addition, the mentioned traits in the first harvest increased by 127.8, 194.6, 159.8, 147.7, 17.7, and 37.9% in comparison with the second harvest. Also, the essential oil content of peppermint is enhanced with increasing water stress to mild stress. So, the essential oil content in mild stress increased by 11.4 and 39.7%, respectively, when compared with non-stress and severe stress. The highest essential oil yield was achieved at the first harvest with the integrative application of 75% NF+ AMF. Also, the major essential oil compounds of peppermint (menthol) was recorded in mild stress integrated with 75% nitrogen fertilizer+ AMF. Generally, considering that the economic purpose of cultivating medicinal plants is extracting the maximum content of secondary metabolites, and since the productivity of peppermint essential oil increased significantly by the integrative application of 75% nitrogen fertilizer+ mycorrhiza in mild stress, it can be suggested as a superior treatment.

Keywords: Bio-fertilizer, Essential oil yield, Menthol, Sustainable agriculture, Water deficit

نشریه بوم شناسی کشاورزی
Homepage: https://agry.um.ac.ir/

مقاله پژوهشی
جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱٤۰۲، ص ۱۱۸-۸۹

کاربرد قارچ میکوریز (*Rhizophagus intraradices*) و کود نیتروژنه در رژیم‌های مختلف آبیاری بر خصوصیات کمّی و کیفی نعناع‌فلفلی (*Mentha piperita* L.)

عبدالله جوانمرد[1]*، علی استادی[2] و مصطفی امانی ماچیانی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹

چکیده

به‌منظور ارزیابی اثر سطوح آبیاری و منابع کودی مختلف بر صفات مورفولوژیک، کمیت و کیفیت اسانس نعناع فلفلی در دو چین، آزمایشی به‌صورت اسپلیت اسپلیت پلات با ۳۶ تیمار و سه تکرار در دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه در سال زراعی ۱۳۹۸ اجرا شد. فاکتور اصلی شامل سطوح مختلف آبیاری در سه سطح: آبیاری پس از ۳۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (آبیاری نرمال)، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (تنش ملایم) و آبیاری پس از ۷۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (تنش شدید) بود. همچنین فاکتور فرعی منابع مختلف کودی را در شش سطح: عدم مصرف کود (شاهد)، ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه، قارچ میکوریز (*Rhizophagus intraradice*)، ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز شامل می‌شد و فاکتور فرعی فرعی هم شامل زمان برداشت در دو چین بود. نتایج نشان داد، همه صفات مورد مطالعه تحت تأثیر معنی‌دار کود، چین، اثر متقابل تنش × کود، اثر متقابل چین × تنش قرار گرفتند. همچنین، اثر متقابل چین × کود بر صفات ارتفاع بوته، تعداد گره، تعداد شاخه جانبی در بوته و عملکرد اسانس معنی‌دار بود. بیشترین ارتفاع بوته، شاخص کلروفیل و عملکرد ماده خشک به‌ترتیب در آبیاری نرمال با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و کمترین مقادیر این صفات در تیمار تنش آبی شدید بدون مصرف کود به‌دست آمد. علاوه‌براین، کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز منجر به افزایش ۴۴/۱، ۳۸/۸ و ۲۱/۱ درصد این صفات نسبت به شاهد گردید. همچنین، چین اول نسبت به چین دوم به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۲۷/۸، ۱۷/۷ و ۲۷/۹ درصدی این صفات گردید. بیشترین (۲/۴ درصد) و کمترین (۱/۲ درصد) درصد اسانس به‌ترتیب در تیمارهای تنش آبی ملایم با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و تنش آبی شدید بدون مصرف کود حاصل شد. بر اساس آنالیز شیمیایی اسانس، منتول، منتون، ۱و۸ سینئول و منتوفروان ترکیبات غالب اسانس بودند. بیشترین میزان منتول در تنش آبی ملایم با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد. با توجه به نتایج، کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز در شرایط تنش آبی ملایم و در چین اول را می‌توان به‌عنوان تیمار برتر معرفی کرد.

واژه‌های کلیدی: عملکرد اسانس، کشاورزی پایدار، کمبود آب، کود زیستی، منتول

مقدمه

۱- استاد گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.
۲- استادیار گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران.
(*- نویسنده مسئول: Email:a.javanmard@maragheh.ac.ir)

بیش از ۷۵ درصد اراضی ایران جزو اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌گردد. متوسط بارندگی سالانه در ایران ۲۷۵-۲۲۴ میلی‌متر است که ۷۰ درصد کمتر از متوسط جهانی (۹۹۰ میلی‌متر در سال) می‌باشد (Biglari et al., 2019). گزارش‌های جهانی تغییرات اقلیمی، کاهش بارندگی، افزایش دما و خشکسالی را برای این منطقه پیش‌بینی کرده‌اند. تنش خشکی یکی از مهمترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در سرتاسر جهان و جزو شایع‌ترین تنش‌های محیطی محسوب می‌شود (Varma et al., 2018). تنش خشکی با توجه به مدت زمان، دوام و اندازه کمبود آن تأثیرات منفی بر صفات مورفولوژیکی و فیزیولوژیکی گیاهان دارد. در طی مراحل رشدی گیاه، تنش خشکی باعث کاهش رشد ریشه، جذب آب، مواد مغذی، بزرگ شدن سلول‌ها، سنتز کلروفیل، گسترش برگ، فتوسنتز، ارتفاع بوته و سطح برگ می‌شود (Gao et al., 2020). اولین پاسخ گیاه به تنش خشکی این است که با کاهش پتانسیل آب برگ، روزنه‌ها بسته شده و به‌دنبال آن تعرق کاهش می‌یابد. در نتیجه، با کم شدن غلظت کربن دی‌اکسید، فتوسنتز کاهش می‌یابد. پایین بودن غلظت کربن دی‌اکسید درون سلولی باعث کاهش واکنش‌های چرخه کالوین می‌شود که در نتیجه آن ATP و NADPH کمتری مصرف خواهد شد.

بسیاری از گیاهان به‌خصوص گیاهان دارویی و معطر دارای مکانیسم‌های خاصی (افزایش متابولیت‌های ثانویه) جهت مقابله با شرایط کم‌آبی و افزایش کارایی مصرف آب می‌باشند (Morshedloo et al., 2017). به‌عنوان مثال در پژوهشی، تنش آبی عملکرد و ترکیبات اصلی اسانس (لینالول و متیل کاویکول) در گیاه ریحان (*Ocimum basilicum* L.) را افزایش داد (Khalid, 2006). در پژوهشی دیگری با بررسی سطوح مختلف تنش آبی روی مریم‌گلی (*Salvia officinalis* L.)، گزارش شد که تنش آبی متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) منجر به افزایش درصد و عملکرد اسانس نسبت به شاهد گردید. همچنین بیشترین میزان آلفا توجن، ۱و۸ سینئول و کامفور در تنش آبی متوسط به‌دست آمد (Govahi et al., 2015)(). صفی خانی و همکاران (Safikhani et al., 2007) به‌منظور بررسی تنش کم‌آبی روی گیاه دارویی بادرشبی (*Dracocephalum moldavica* L.) گزارش کردند که تنش کم‌آبی (۴۰ درصد ظرفیت زراعی)، موجب کاهش ارتفاع بوته، طول، عرض برگ، طول میان‌گره، عملکرد اندام هوایی و عملکرد اسانس نسبت به شاهد شد. همچنین کم‌آبی باعث افزایش درصد اسانس نسبت به تیمار بدون تنش گردید و بیشترین اسانس مربوط به تنش متوسط (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) بود. در مطالعه‌ای دیگر با ارزیابی سطوح مختلف تنش آبی روی نعناع فلفلی گزارش شد که با افزایش تنش آبی مساحت سطح برگ، تعداد برگ و وزن خشک برگ کاهش یافت، ولی درصد اسانس با افزایش تنش آبی افزایش یافت، به‌طوری‌که بیشترین میزان درصد اسانس در تنش آبی ۲۵ درصد ظرفیت زراعی مشاهده گردید که تفاوت معنی‌داری با ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نداشت (Rahimi et al., 2018).

نعناع فلفلی (*Mentha piperita* L.) یک گیاه دارویی چندساله متعلق به خانواده نعنائیان (Lamiaceae) با مصرف سالانه ۷۰۰۰ تن اسانس در جهان از اهمیت اقتصادی زیادی برخوردار می‌باشد. نعناع‌فلفلی یک گیاه هیبرید بین گونه‌ای است که والدین آن را *Mentha aquatic* و *Mentha spicata* ذکر کرده‌اند (Peter, 2006). عصاره نعناع‌فلفلی حاوی ترپینوئیدها، فلاونوئیدها، پلی‌فنول‌ها، کاروتن، آلفا توکوفرول، بتائین و کولین می‌باشند که حاوی خاصیت آنتی‌اکسیدانی هستند. این ترکیبات با غیر فعال کردن رادیکال‌های آزاد، از آسیب به ساختارهای بیولوژیکی گیاه جلوگیری می‌کنند (Chiappero et al., 2019).

در طول دهه‌های گذشته به‌دلیل افزایش جمعیت، استفاده از کودهای شیمیایی برای تولید بیشتر محصولات کشاورزی افزایش یافته که این امر منجر به تخریب ساختمان خاک، تجمع فلزات سنگین، تشدید آلودگی‌های زیست‌محیطی، به خطر افتادن سلامت انسان‌ها و کاهش ارزش غذایی محصولات کشاورزی شده است. در اکثر کشورهای جهان از جمله ایران به‌میزان عناصر سمی همراه کود (فلزات سنگین مثل جیوه، کادمیوم، سرب و آرسنیک) توجهی ندارند. این آلاینده‌های سمی در خاک باقی مانده و مشکلات زیست‌محیطی از قبیل آلودگی آب‌های زیرزمینی، اوتروفیکاسیون، کاهش تنوع زیستی، تخریب لایه اوزون و به خطر افتادن امنیت غذایی در آینده را به بار می‌آورند. از طرفی، کارایی جذب عناصر غذایی در شرایط خشکی کاهش می‌یابد (Nadarajan & Sukumaran, 2021). لذا پایین بودن کارایی جذب کودهای شیمیایی از یک طرف و اثرات منفی کاربرد این کودها در درازمدت، لزوم استفاده از کشاورزی پایدار

DOI: 10.22067/agry.2021.20272.0

را ضروری می‌سازد (Solanki et al., 2015). استفاده از کودهای زیستی همچون قارچ میکوریز به‌عنوان جایگزین مناسب کودهای شیمیایی مورد توجه قرار گرفته است.

قارچ میکوریز با بیش از ۸۰ درصد گونه‌های گیاهی رابطه همزیستی برقرار می‌کند (Varma et al., 2018). به‌دلیل افزایش سطح مؤثر ریشه و توانایی افزایش جذب فسفر از منابع غیرمتحرک به‌واسطه فعالیت آنزیم فسفاتاز و ترکیبات آلی حل‌کننده فسفات نامحلول، موجب استفاده تجاری از قارچ‌های میکوریز آربوسکولار به‌عنوان کودهای زیستی شده است (Willmann et al., 2013). این قارچ‌ها مقاومت گیاه در برابر تنش‌های زیستی و غیرزیستی از قبیل خشکی، کمبود مواد غذایی و شوری را بهبود می‌بخشند (Lenoir et al,. 2016). در شرایط تنش آبی نرخ تبادل گاز (هدایت روزنه‌ای، تعرق و سرعت فتوسنتز) در گیاهان تلقیح شده با قارچ افزایش می‌یابد (Egamberdieva et al., 2015). همچنین هیف‌های خارجی قارچ میکوریز مساحت سطح جذبی ریشه را افزایش داده که این عمل مقاومت در برابر جذب آب از طریق ریشه‌ها را کاهش داده و از این طریق مقاومت گیاه در برابر تنش خشکی افزایش می‌یابد (Varma et al., 2018).

در پژوهشی با بررسی تأثیر قارچ میکوریز (Glomus mossae، G. intraradices و G. hoci)، سطوح مختلف آبیاری و فسفر روی نعناع‌فلفلی گزارش شد که با افزایش تنش آبی، صفات رویشی، فیزیولوژیکی و عملکرد اسانس کاهش یافت. امّا کاربرد ترکیبی هر سه قارچ میکوریز منجر به افزایش ۳۶/۹ درصدی وزن خشک کل شد. بیشترین میزان درصد اسانس در تنش آبی شدید (۱۵۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) و کاربرد ترکیبی قارچ‌ها به‌دست آمد. همچنین بیشترین عملکرد اسانس در تنش آبی ملایم (۱۱۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر) و با کاربرد قارچ Glomus mossae + ۵۰ درصد فسفر توصیه شده به‌دست آمد (Eslami Fard et al., 2019). در مطالعه دیگری نیز با بررسی تأثیر قارچ‌های Trichoderma harzianum و Piriformospora indica بر صفات مورفولوژیک و عملکرد اسانس نعناع‌فلفلی در سطوح مختلف تنش آبی و فسفر مشاهده شد که بیشترین عملکرد اسانس در آبیاری ۸۰ میلی‌متر تبخیر از تشتک تبخیر و با کاربرد تلفیقی هر دو قارچ و مصرف ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار کود فسفر به‌دست آمد. همچنین کاربرد تلفیقی دو قارچ به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۴/۳ و ۱۶/۲ درصدی وزن ماده خشک و عملکرد اسانس نسبت به عدم مصرف قارچ گردید (Vafayi Rostami et al., 2019). در پژوهشی دیگر نیز با کاربرد قارچ میکوریز (Rhizophagus intraradices, Funneliformis mosseae) روی آویشن باغی (Thymus vulgaris L.) مشاهده شد که تلقیح با قارچ میکوریز اثرات سوء تنش آبی را کاهش داد. به‌طوری‌که در شرایط تنش، تلقیح با قارچ میکوریز به افزایش وزن خشک ریشه، ساقه، درصد و عملکرد اسانس منجر گردید همچنین بیشترین میزان تیمول در شرایط بدون تنش و تلقیح با قارچ میکوریز به‌دست آمد (Abdollahi Arpanahi & Feizian, 2019). در مطالعه‌ای دیگر مشاهده کردندکه وزن خشک ساقه، تعداد برگ، فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و جذب عناصر غذایی در دو اکوتیپ کاسنی (سفید اصفهان و سیاه شیراز) (Cichorium intybus L.) با کاربرد قارچ میکوریز (Rhizophagus irregularis) نسبت به عدم کاربرد قارچ در شرایط تنش خشکی افزایش یافت (Safahani Langeroodi et al., 2020). در پژوهشی دیگر که روی دو ژنوتیپ (IC 599368 و IC 589192) ریحان (Ocimum tenuiflorum L.) انجام شد، مشخص شد که کاربرد قارچ میکوریز (Rhizophagus intraradices) منجر به افزایش وزن خشک برگ و درصد اسانس در هر دو گونه نسبت به عدم کاربرد قارچ میکوریز شد. همچنین بیشترین میزان بتا کاریوفیلن و بتا الیمن در هر دو گونه با کاربرد قارچ میکوریز به‌دست آمد (Thokchom et al., 2020).

از آنجایی‌که راهکارهای زیادی به‌منظور کاهش اثرات منفی تنش خشکی وجود دارد (Farooq et al., Seleiman et al., 2021 ; 2009). در این بین، تلقیح با قارچ میکوریز به‌دلیل داشتن توانایی بالقوه در بهبود اثرات مخرب تنش خشکی مورد توجه زیادی قرار گرفته است. بدین منظور، آزمایشی با هدف ارزیابی تأثیر قارچ میکوریز و کود نیتروژنه به‌صورت جداگانه و تلفیقی بر صفات رشدی، کمیت و کیفیت اسانس نعناع‌فلفلی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری در شرایط آب و هوایی مراغه اجرا گردید.

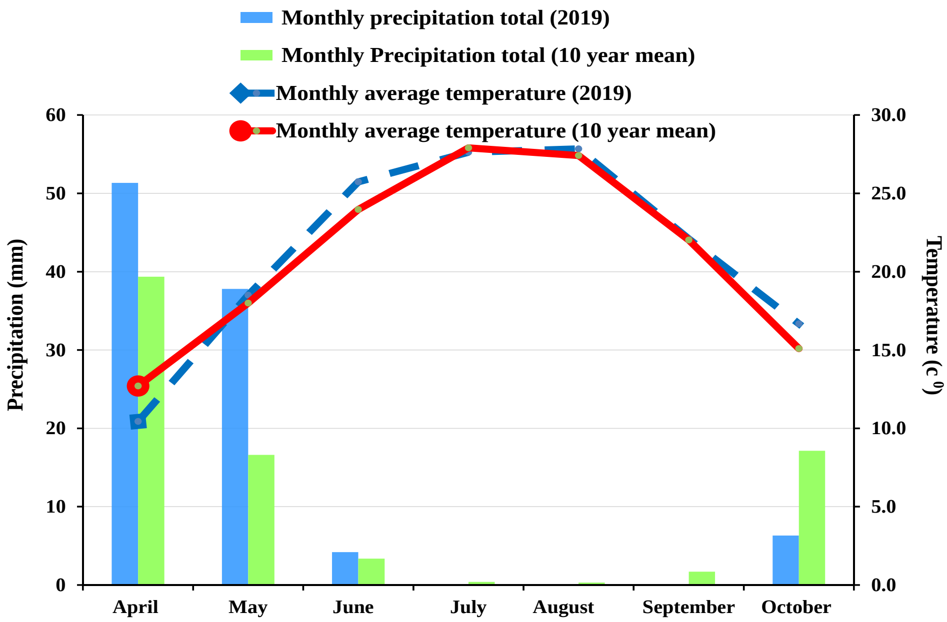
مواد و روش‌ها

این پژوهش به‌صورت اسپلیت اسپلیت پلات بر پایه طرح بلوک کامل تصادفی با ۳۶ تیمار و سه تکرار در مزرعه دانشکده کشاورزی دانشگاه مراغه با طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۱۶ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۲۳ دقیقه شمالی و با ارتفاع ۱۴۸۵ متر از

سطح دریا در سال ۱۳۹۸ اجرا گردید. فاکتور اصلی شامل سطوح مختلف آبیاری در سه سطح، آبیاری پس از ۳۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (آبیاری نرمال)، آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (تنش ملایم) و آبیاری پس از ۷۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی (تنش شدید) بود. فاکتور فرعی هم منابع مختلف کودی شامل عدم مصرف کود (شاهد)، ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه (۱۵۰ کیلوگرم در هکتار نیتروژن خالص) (Peter, Omidbaigi, 2012 ; 2006)، کاربرد قارچ میکوریز (*Rhizophagus intraradices*)، ۷۵ درصد کود نیتروژنه + قارچ میکوریز، ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز بود. نیتروژن مورد نیاز در این آزمایش از منبع کود اوره (دارای ۴۶ درصد نیتروژن خالص) محاسبه و تأمین گردید. همچنین فاکتور فرعی فرعی شامل زمان برداشت (چین اول و دوم) بود. قبل از اجرای آزمایش یک نمونه خاک از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متری جهت تعیین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آن انتخاب و مورد تجزیه قرار گرفت (جدول ۱).

جدول ۱- نتایج تجزیه خاک قبل از شروع آزمایش (عمق ۳۰-۰ سانتی‌متر)
Table 1- Soil analysis results before beginning the experiment (depth 0-30 cm)

بافت Texture	شن Sand (%)	سیلت Silt (%)	رس Clay (%)	ماده آلی Organic matter (%)	هدایت الکتریکی EC ($dS.m^{-1}$)	pH	مقدار پتاسیم تبادلی Amount of exchangeable K ($mg.kg^{-1}$)	ظرفیت تبادل کاتیونی Cation exchange capacity ($Cmolc.kg^{-1}$)	فسفر قابل جذب Available P ($mg.kg^{-1}$)	نیتروژن کل Total N (%)
لومی رسی شنی Sandy clay loam	56	16.5	27.5	0. 08	1.18	8.16	570.85	27	9.42	0.089



شکل ۱- مجموع بارش ماهانه و میانگین دمای ماهانه سال ۱۳۹۸ در حین اجرای آزمایش در مقایسه با میانگین ۱۰ ساله
Fig. 1- Monthly total rainfall and mean temperature in 2018 during the experiment in comparison with the 10-year (2008–2018) average values

به‌منظور آماده‌سازی زمین جهت کاشت، ابتدا در پاییز ۱۳۹۷ شخم نیمه عمیق توسط گاوآهن برگردان‌دار انجام و در بهار ۱۳۹۸ پس از شخم سطحی، برای نرم کردن خاک از دو نوبت دیسک عمود بر هم استفاده گردید. هر کرت شامل پنج خط کاشت به طول چهار متر بود. فواصل بین کرت‌های اصلی، فرعی و بین بلوک‌ها به‌ترتیب ۱/۵، ۰/۵ و دو متر در نظر گرفته شد. سپس ریزوم‌ها در اواسط اردیبهشت ماه با تراکم ۱۰ بوته در متر مربع در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک با دست کشت شدند. همچنین فواصل بین و روی ردیف‌های کشت به‌ترتیب ۴۰ و ۲۵ سانتی‌متر لحاظ گردید (Clark & Read, 2000). قارچ میکوریز مورد استفاده در این تحقیق (*Rhizophagus intraradices*)، از شرکت زیست فناور پیشتاز واریان کرج تهیه گردید. موقع کاشت به‌مقدار ۸۰ گرم از خاک حاوی هیف‌های قارچ میکوریز، بقایای ریشه و اسپور (حدود ۱۰۰۰ اسپور در هر ۱۰ گرم خاک)، در هر ردیف کشت استفاده گردید. علاوه‌براین، کود اوره نیز در سه نوبت (هم‌زمان با کاشت، قبل از مرحله گل‌دهی در چین اول و بعد از برداشت چین اول) بر اساس تیمارهای مورد نظر استفاده شد (Peter, 2006Omidbaigi, 2012;). اولین نوبت آبیاری بلافاصله بعد از کاشت به‌صورت قطره‌ای و در مراحل بعدی تا شروع اعمال تیمارها هر شش روز یک‌بار صورت گرفت (Marcum & Hanson, Telci et al., 20112006;). به‌منظور سازگاری بیشتر نشاهای منتقل شده به خاک و حصول رشد بهینه در ماه اول هیچ گونه تنشی اعمال نگردید. برای اعمال سطوح تنش خشکی از دستگاه تی‌دی‌آر[1] بر اساس حداکثر درصد تخلیه مجاز[2] از آب در دسترس[3] درعمق ۲۰ سانتی‌متری استفاده شد. اعمال تنش‌ها با استفاده از معادله‌های زیر مورد محاسبه قرار گرفت (Bahreininejad et al., 2013):

$$SAW= (\theta_{fc}- \theta_{pwp}) \times d \times 100$$ معادله (۱)

$$I_d= SAW \times p$$ معادله (۲)

$$I_g= [I_d \times 100] / E_a$$ معادله (۳)

که در آن، θ_{fc}، θ_{pwp}، d، p، I_d، E_a و I_g: به‌ترتیب ظرفیت زراعی خاک (۲۷/۴ درصد)، نقطه پژمردگی دائم (۱۳/۹ درصد)، عمق خاک (سانتی‌متر)، درصد تنش اعمال شده (۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد)، عمق آبیاری (۲۰ سانتی‌متر)، کارایی آبیاری (۶۵ درصد در نظر گرفته شده است) و میزان نهایی آبیاری در تنش‌های مختلف می‌باشد. برای محاسبه حجم آبیاری، از حاصل ضرب مقدار عمق خالص آبیاری محاسبه شده در مساحت هر کرت استفاده شد. با توجه به اینکه نوع آبیاری مورد استفاده در این آزمایش قطره‌ای بود، جهت محاسبه میزان زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم مطلوب هر کرت، نیاز به تعیین میزان سطح خیس شوندگی خاک (P_W) بود (Mumivand, 2016).

معادله (۴) $P_w=W/D$

که در آن، P_w، W و D: به‌ترتیب درصد سطح خیس شده مزرعه، عرض خیس شده توسط قطره چکان و فاصله بین ردیف‌های کشت می‌باشد. با توجه به این که تعداد قطره چکان موجود در هر کرت و همچنین دبی آب ورودی (اندازه گیری شده توسط فلومتر) به سطح هر کرت مشخص می‌باشد، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حجم آبیاری مورد نظر برای هر کرت از طریق معادله زیر محاسبه گردید (Mumivand, 2016):

معادله (۵)

$$\text{زمان مورد نیاز} = \frac{\text{حجم آب مورد نیاز}}{\text{دبی آب ورودی} \times \text{تعداد قطره چکان در هر کرت}}$$

شاخص کلروفیل توسط دستگاه کلروفیل‌متر[4] مدل Spad 502 Plus ساخت کشور ژاپن، از آخرین برگ کاملاً توسعه یافته در پنج بوته به‌طور تصادفی اندازه‌گیری شد. در نهایت، بعد از حذف اثرات حاشیه، برداشت در هر دو چین در مساحتی معادل دو مترمربع با هدف اندازه‌گیری ارتفاع بوته، تعداد گره در بوته، تعداد برگ در بوته، تعداد شاخه جانبی در بوته، وزن کل ماده خشک، درصد و عملکرد اسانس صورت گرفت. لازم به ذکر است در هر دو چین، برداشت در مرحله ۵۰ درصد گل‌دهی انجام گرفت که برداشت چین اول و دوم به‌ترتیب مصادف با نیمه اول مرداد و مهرماه بود. برای تعیین وزن خشک، نمونه‌های برداشت شده از هر کرت را در سایه تا ثابت شدن وزن نگهداری شدند. همچنین برای استخراج اسانس از کلونجر استفاده شد. اسانس‌گیری به‌مدت سه ساعت صورت گرفت، ابتدا اسانس‌های استخراج شده با سولفات سدیم خشک آب‌گیری و سپس داخل ویال

1– Time-Domain Reflectometry, Model TRIME-FM, England
2 – Maximum allowable depletion- MAD
3 – Soil available water- SAW

4- SPAD

شیشه‌ای در دمای چهار درجه سانتی‌گراد تا زمان آنالیز نگهداری شدند. درصد و عملکرد اسانس براساس معادله‌های زیر محاسبه شدند (Morshedloo et al., 2017):

معادله (۶)

۱۰۰ × (وزن خشک نمونه (۴۰ گرم)/ وزن اسانس)= درصد اسانس

معادله (۷)

درصد اسانس × ماده کل خشک (گرم در مترمربع)=عملکرد اسانس

شناسایی ترکیبات اسانس

برای شناسایی ترکیبات اسانس از دستگاه کروماتوگرافی گازی متصل شده به طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) مدل Agilent 5977A ساخت کشور آمریکا، با ستون HP-5 MS (پنج درصد فنیل متیل پلی سیلوکسان، به‌طول ۳۰ متر، قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر و ضخامت ماده جاذب ۰/۲۵ میکرومتر) استفاده شد. در برنامه‌ریزی دمایی آون، ابتدا دما در عرض پنج دقیقه به ۶۰ درجه سانتی‌گراد رسیده سپس به‌تدریج دما با سرعت سه درجه سانتی‌گراد بر دقیقه افزایش یافت تا به دمای ۲۴۰ درجه سانتی‌گراد رسید. بعد از آن به‌مدت ۲۰ دقیقه در این دما نگه‌داری شد. هلیوم به‌عنوان گاز حامل با سرعت جریان یک میلی‌لیتر بر دقیقه استفاده شد. ولتاژ یونیزاسیون ۷۰ الکترون ولت، روش یونیزاسیون EI و دمای یونیزاسیون ۲۲۰ درجه سانتی گراد بود. محفظه تزریق در حالت تقسیم (نسبت تقسیم ۱:۳۰) تنظیم شده بود و محدوده جذب جرمی از ۴۰ تا $m.z^{-1}$ ۴۰۰ بود. به‌منظور محاسبه شاخص بازداری پیک‌ها، مخلوطی از هیدروکربن‌های آلیفاتیک (C8-C40) تحت شرایط تحلیلی بالا به داخل سیستم GC تزریق شد. نرم افزار مورد استفاده Chemstation بود. محاسبه و شناسایی ترکیبات اسانس به‌کمک شاخص‌های بازداری خطی آن‌ها و مقایسه آن با شاخص‌های موجود در کتاب مرجع (Adams, 2007) و با استفاده از طیف‌های جرمی ترکیبات استاندارد و استفاده از اطلاعات موجود در کتابخانه کامپیوتری صورت گرفت (Morshedloo et al., 2018). به‌منظور محاسبه شاخص بازداری از معادله زیر استفاده گردید (Babushok et al., 2007):

معادله (۸) شاخص بازداری = $(100\times n) + (100\times(t_x-t_n) / (t_{n+1} - t_n))$

که در آن، n: شماره هیدروکربن‌های آلیفاتیک رفرنس پایین‌تر از زمان بازداری ترکیب اسانس، t_x: زمان بازداری ترکیب اسانس، t_n: زمان بازداری هیدروکربن‌های آلیفاتیک رفرنس که قبل از ترکیب اسانس از ستون خارج می‌شود و t_{n+1}: زمان بازداری هیدروکربن‌های آلیفاتیک رفرنس که بعد از ترکیب اسانس از ستون خارج می‌شود، می‌باشند.

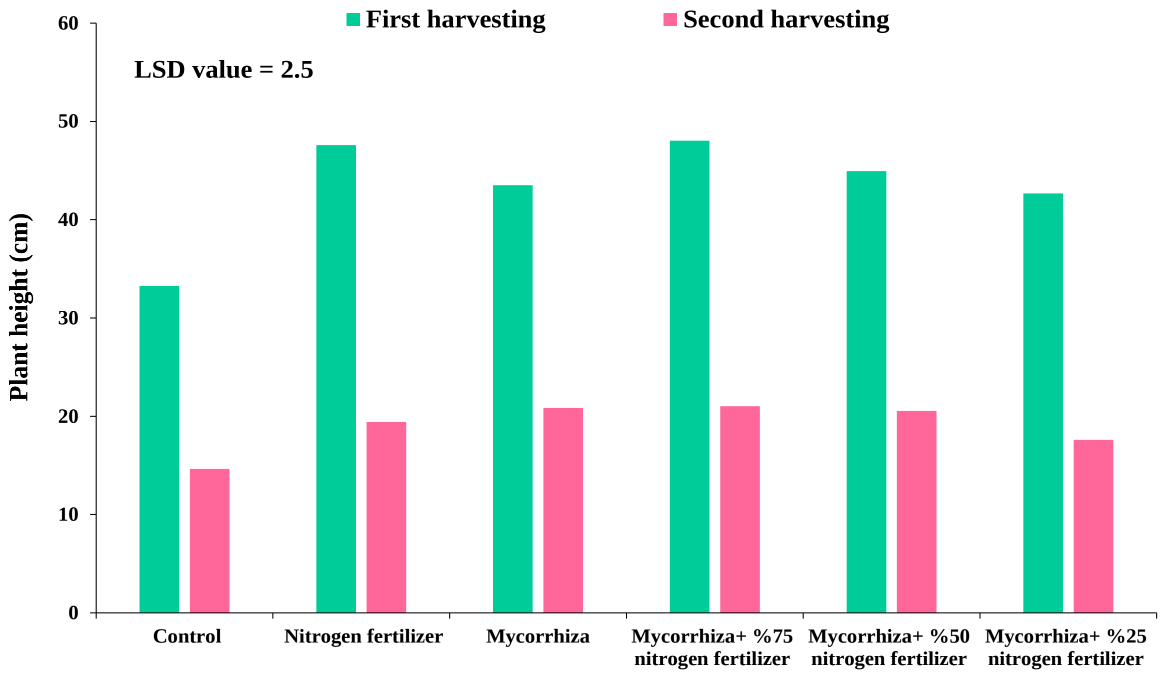
برای جداسازی ترکیبات از دستگاه کروماتوگرافی گازی مدل Agilent 7990B ساخت کشور آمریکا با آشکارساز یونیزاسیون شعله‌ای (FID) و ستون VF-5MS استفاده شد. دمای تزریق و آشکارساز به‌ترتیب روی ۲۳۰ و ۲۴۰ سانتی‌گراد تنظیم شده بودند. گاز هلیوم با سرعت جریان یک میلی لیتر بر دقیقه و نسبت تقسیم ۱:۲۴ استفاده شده بود. نمونه‌های اسانس به نسبت ۱:۱۰۰ در هگزان رقیق-سازی و به‌میزان یک میکرولیتر تزریق شدند. کمّی کردن ترکیبات اسانس با استفاده از نرمال‌سازی سطح پیک و بدون استفاده از ضرایب اصلاح انجام شد (Amani Machiani et al., 2018b). با تجزیه اسانس نعناع فلفلی، ۲۹ ترکیب شناسایی شد. در بین ترکیبات اسانس منتول، منتون، ۸ و۱ سینئول، منتوفوران، نئوایزو- منتول، نئومنتول و دلتا- ترپینئول ترکیبات غالب اسانس بودند. در نهایت، بعد از اطمینان از نرمال بودن داده‌ها، تجزیه واریانس به‌صورت اسپلیت اسپلیت پلات و با استفاده از نرم‌افزار آماری SAS نسخه ۹/۳ انجام شد. همچنین برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد و برای رسم نمودارها از نرم‌افزار Excel استفاده شد.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که ارتفاع بوته تحت تأثیر معنی‌دار اثرات ساده تنش، کود، چین و اثرات متقابل تنش × کود، چین × تنش و چین × کود در سطح احتمال یک درصد قرار گرفت (جدول ۲). با افزایش تنش آبی ارتفاع بوته کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین (۳۸/۲ سانتی‌متر) ارتفاع بوته در آبیاری نرمال با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمار ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه در آبیاری نرمال نداشت و کمترین ارتفاع بوته (۱۹/۶ سانتی‌متر) هم در تنش شدید بدون مصرف کود به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین ارتفاع بوته در چین اول و در آبیاری نرمال به‌دست آمد (جدول ۴). علاوه‌براین، بر اساس نتایج اثر متقابل چین × کود، بیشترین ارتفاع بوته در چین اول با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کاربرد ۱۰۰

درصد کود نیتروژنه در همان برداشت نداشت (شکل ۲). بیشتر بودن ارتفاع بوته در چین اول نسبت به چین دوم به بیشتر بودن طول دوره در چین اول و ایجاد شرایط بهینه برای گیاه در چین اول (از قبیل بیشتر بودن طول روز و تابش آفتاب، دمای محیط و ...) نسبت به چین دوم مربوط می‌شود (Amani Machiani et al., 2018a). در پژوهشی با بررسی منابع مختلف کودی بر خصوصیات کمّی و کیفی گشنیز (*Coriandrum sativum* L.) مشاهده گردید؛ که چین اول نسبت به چین دوم منجر به افزایش ۳۱/۵ درصد ارتفاع بوته گردید (Bigonah et al., 2014). ارتفاع گیاه به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم رشدی برای نشان دادن رشد محصول و جذب نیتروژن در مرحله رویشی گیاه به‌حساب می‌آید و یکی از صفات مهمی است که عملکرد محصول را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Jiang et al., 2020). بر اثر تنش کم‌آبی، توژسانس سلولی کاهش در نتیجه، باعث کاهش رشد و نمو، تقسیم و طویل شدن سلول‌های به‌ویژه در قسمت‌های هوایی گیاه می‌گردد. بر اثر کمبود آب هدایت روزنه‌ای بر اثر افزایش مقاومت در برابر انتشار گاز کربن دی‌اکسید به‌دلیل مهار فعالیت روبیسکو، کاهش می‌یابد که می‌تواند منجر به افزایش پتانسیل آب گیاه شود (Varma et al., 2018). در تنش خشکی قارچ میکوریز با افزایش سنتز هورمون آبسزیک اسید در ریشه و انتقال آن به اندام‌های هوایی باعث بسته شدن روزنه‌ها، کاهش از دست دادن آب و حفظ تورژسانس سلول‌ها می‌شود، همچنین قارچ میکوریز احتمالاً به جذب بهتر عناصر غذایی از قبیل نیتروژن و فسفر کمک کرده که در نهایت، منجر به بهبود صفات رشدی و عملکردی از قبیل ارتفاع بوته و تعداد شاخ و برگ می‌گردد (Ludwig-Müller, 2010). در پژوهشی، کاربرد قارچ میکوریز (*Rhizophagus clarus*) منجربه افزایش ۴۱/۳ و ۱۵/۲ درصدی ارتفاع بوته و تعداد برگ در هر بوته نعناع (*Mentha crispa* L.) نسبت به شاهد گردید (Urcoviche et al., 2015). همچنین در پژوهشی که با کاربرد سطوح مختلف تنش آبی و دو گونه قارچ میکوریز (*Glomus intraradices* و *Glomus mosseae*) روی رازیانه (*Foeniculum vulgare* Mill.) انجام شد، مشخص گردید که بیشترین ارتفاع بوته و وزن خشک در آبیاری نرمال و با کاربرد قارچ میکوریز به‌دست آمد (Gheisari Zardak et al., 2017).

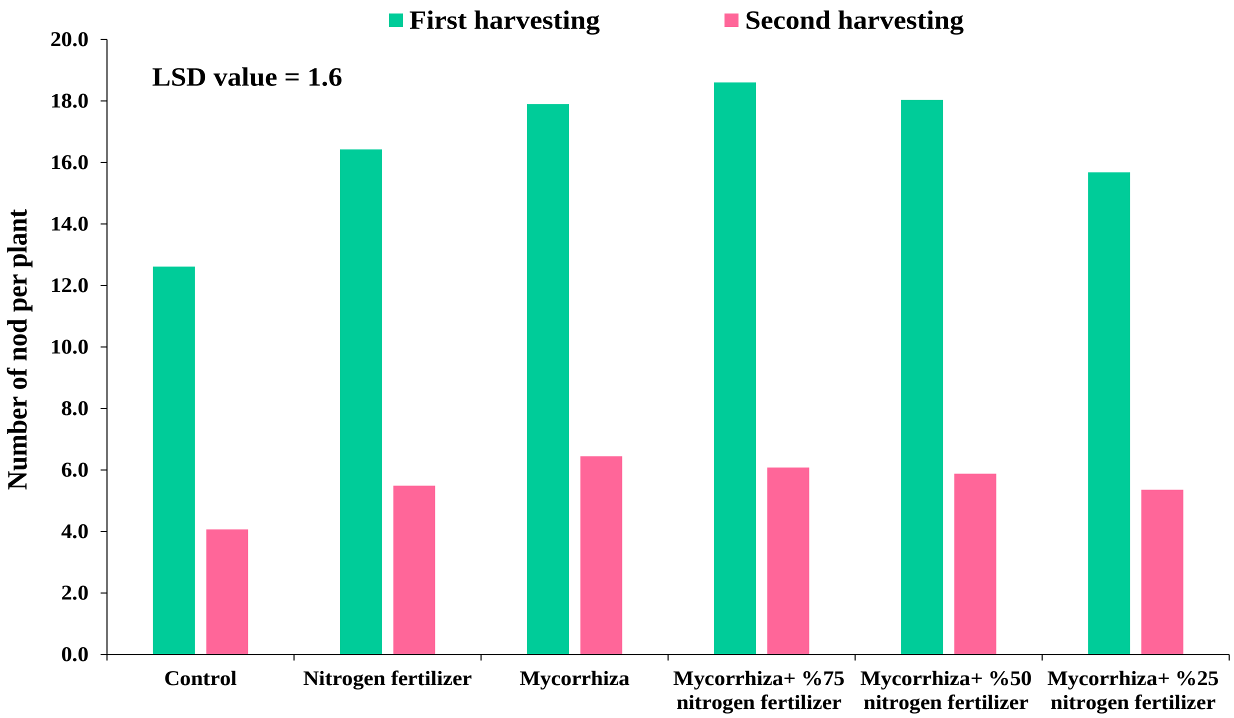


شکل ۲- مقایسه میانگین اثر متقابل چین و منابع کودی مختلف بر ارتفاع بوته نعناع فلفلی

Fig. 2- Means comparison of the interaction effect of harvesting time and different fertilizer resources on plant height of *Mentha piperita* L.

تعداد گره در هر بوته

اثر کود، اثر ساده چین، اثر متقابل تنش × کود و اثر متقابل چین × تنش در سطح احتمال یک درصد و اثر ساده تنش و اثر متقابل چین × کود در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد گره در بوته معنی‌دار گردید (جدول ۲). بیشترین تعداد گره در هر بوته (۱۴/۵) در آبیاری نرمال و با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد، همچنین کمترین میزان تعداد گره در هر بوته (۶/۵) در تنش شدید بدون مصرف کود به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین تعداد گره در هر بوته در چین اول و در آبیاری نرمال به‌دست آمد (جدول ۴). علاوه‌براین، بر اساس نتایج اثر متقابل چین × کود، بیشترین تعداد گره در هر بوته در چین اول با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کاربرد انفرادی قارچ میکوریز و ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز در همان برداشت نداشت (شکل ۳) . تنظیم اسمزی با کاهش پتانسیل آبی برگ، به حفظ رطوبت نسبی آن کمک کرده که از این طریق به بهبود رشد گیاه منجر خواهد شد، زیرا تنظیم اسمزی به‌عنوان یکی از مکانیسم‌های اجتناب از تنش در نظر گرفته می‌شود. در طی این پدیده، غلظت برخی یون‌ها نظیر پتاسیم، سدیم، کلر و ... در واکوئل و نیز برخی متابولیت‌ها نظیر اسیدهای آمینه، قندها، پلی‌اول‌ها، پلی‌آمین‌ها، ترکیبات آمونیومی چهارتایی، پروتئین‌های خاص و اسیدهای آلی در سیتوسول افزایش می‌یابد و بدین ترتیب با کاهش پتانسیل اسمزی، فشار آماس سلول در سطح بالا حفظ و ادامه فعالیت‌های فیزیولوژیکی گیاه امکان‌پذیر خواهد شد (Ozturk et al., 2020). قارچ میکوریز با تجمع املاح اسمزی، پرولین، کربوهیدرات‌های غیر ساختاری و تجمع یونی (پتاسیم، کلسیم و منیزیم) تعادل اسمزی را حفظ که از این طریق با حفظ تورژسانس به ادامه رشد سلول منجر خواهد شد (Ruiz-Lozano, 2003). قارچ میکوریز علاوه‌بر توانایی جذب تدریجی عناصر غذایی در شرایط تنش کم‌آبی، جذب آب و هدایت برگی را افزایش و با تنظیم فشار تورژسانس و با حفظ باز بودن روزنه‌ها، کارایی تثبیت کربن دی اکسید و به‌دنبال آن فتوسنتز را بهبود می‌بخشد (Wu et al., 2013). در پژوهشی با بررسی منابع مختلف کودی و زمان برداشت روی نعناع‌فلفلی گزارش کردند که کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود شیمیایی + میکوریز منجر به افزایش ۲۰/۱ درصدی تعداد گره در هر بوته نسبت به شاهد گردید. همچنین چین اول نسبت به چین دوم منجر به افزایش ۱۶۲ درصدی تعداد گره در هر بوته نسبت به شاهد گردید (Ostadi et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر با بررسی رژیم‌های مختلف آبیاری روی چیا (*Salvia hispanica* L.) گزارش کردند که با افزایش تنش آبی ارتفاع بوته، تعداد گره، تعداد شاخه جانبی و عملکرد خشک کاهش یافت. بیشترین و کمترین میزان صفات مذکور به‌ترتیب در آبیاری نرمال و تنش شدید به‌دست آمد (Jamshidi et al., 2020).



شکل ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل چین و منابع کودی مختلف بر تعداد گره در هر بوته نعناع فلفلی

Fig. 3- Means comparison of the interaction effect of harvesting time and different fertilizer resources on the number of nods per plant of *Mentha piperita* L.

جدول ۲- نتایج تجزیه واریانس (میانگین مربعات) اثر تنش آبی، منابع مختلف کودی و چین بر ارتفاع بوته، تعداد گره در هربوته، تعداد برگ در هر بوته، تعداد شاخه جانبی در هر بوته، شاخص کلروفیل، عملکرد وزن خشک، درصد و عملکرد اسانس نعناع فلفلی

Table 2- Results of variance analysis (mean of squares) for the effect of water stress, different fertilizer sources and harvesting time on plant height, number of nod per plant, number of leaves per plant, number of lateral branches per plant, leaf greenness (SPAD index), dry matter yield, essential oil content and yield of *Mentha piperita* L.

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی d.f	ارتفاع بوته Plant height	تعداد گره در هر بوته Number of nod per plant	تعداد برگ در هر بوته Number of leaves per plant	تعداد شاخه جانبی در هر بوته Number of lateral branches per plant	شاخص کلروفیل Leaf greenness (SPAD index)	عملکرد وزن خشک Dry matter yield	درصد اسانس Essential oil content	عملکرد اسانس Essential oil yield
بلوک Block	2	50.3	16.1	214639.5	181.04	130.6	274.2	0.5	0.1
تنش آبی Water stress (W)	2	319.6 **	70.2 *	140050.1 *	85.6 ns	978.9 *	8452.2 **	3.4 **	6.9 **
خطای a Error a	4	12.3	9.7	11005.8	22.3	54.7	164.3	0.1	0.1
کود Fertilizer (F)	5	275.1 **	41.2 **	49398.02 **	110.6 **	436.5 **	390.04 **	0.6 **	0.9 **
کود × تنش F × W	10	28.7 **	9.2 **	14073.5 **	17.9 **	25.3 **	117.2 **	0.08 *	0.07 *
خطای b Error b	30	3.9	1.4	3197.3	2.3	5.99	6.5	0.03	0.03
چین Harvest (H)	1	15979.7 **	3257.1 **	3677454.1 **	13048.2 **	1366.6 **	9488.1 **	8.4 **	16.7 **
چین × تنش H × W	2	46.4 **	24.9 **	53548.4 *	10.7 *	45.2 *	761.6 **	0.35 *	0.9 **
چین × کود H × F	5	41.8 **	8.8 *	15264.95 ns	13.96 **	27.1 ns	26.1 ns	0.1 ns	0.2 *
چین × تنش × کود H × W × F	10	9.01 ns	1.5 ns	4901.4 ns	2.7 ns	7.93 ns	37.6 ns	0.03 ns	0.1 ns
خطای c Error c	36	6.7	2.9	12131.5	3.04	13.2	79.8	0.06	0.07
ضریب تغییرات CV (%)		8.3	15.5	26.5	6.7	9.6	11.7	12.6	17.7

**، * و ns: به‌ترتیب معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد و عدم تفاوت معنی‌دار.

**, * and ns: Significant at 1 and 5% levels of probability and non-significant, respectively.

جدول ۳- مقایسه میانگین اثر متقابل دوره‌های آبیاری و منابع کودی مختلف بر ارتفاع بوته، تعداد گره در هربوته، تعداد برگ در هر بوته، تعداد شاخه جانبی در هر بوته، شاخص کلروفیل، عملکرد وزن خشک، درصد و عملکرد اسانس نعناع فلفلی

Table 3- Means comparison of interaction effects of irrigation levels and different fertilizer resources on plant height, number of nod per plant, number of leaves per plant, number of lateral branches per plant, leaf greenness (SPAD index), dry matter yield, essential oil content and yield of *Mentha piperita* L.

	تیمارها. Treatments	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد گره در هر بوته Number of nod per plant	تعداد برگ در هر بوته Number of leaves per plant	تعداد شاخه جانبی در هر بوته Number of lateral branches per plant	شاخص کلروفیل Leaf greenness (SPAD index)	عملکرد وزن خشک Dry matter yield ($g.m^{-2}$)	درصد اسانس Essential oil content (%)	عملکرد اسانس Essential oil yield ($g.m^{-2}$)
آبیاری بعد از ۳۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 30% available water	شاهد Control	28.9	10.3	373.0	23.5	38.1	81.2	1.6	1.3
	کود نیتروژنه N fertilizer (NF)	37.3	12.98	539.8	28.2	52.9	100.0	1.8	1.8
	قارچ میکوریز Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)	34.1	12.3	455.3	27.1	51.2	86.3	2.01	1.8
	۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز 75% NF+ AMF	38.2	14.5	565.2	29.8	53.9	102.3	2.1	2.2
	۵۰ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 50% NF + AMF	35.02	12.5	527.5	27.02	48.8	96.8	1.99	1.97
	۲۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 25% NF + AMF	32.6	11.4	452.7	26.2	47.04	91.7	2.1	2.01
آبیاری بعد از ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 50% available water	شاهد Control	23.4	8.2	315.8	20.9	34.97	67.4	1.9	1.3
	کود نیتروژنه N fertilizer (NF)	29.3	10.6	358.3	26.02	43.4	73.9	1.98	1.5
	قارچ میکوریز Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)	34.95	12.5	451.0	28.7	47.8	77.8	2.3	1.8
	۷۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 75% NF + AMF	34.3	11.7	409.8	27.2	48.1	76.6	2.4	1.9
	۵۰ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 50% NF + AMF	32.7	12.2	401.2	28.2	46.2	74.6	2.2	1.6
	۲۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 25% NF + AMF	29.6	10.7	433.7	28.8	43.7	73.4	2.2	1.6
آبیاری بعد از ۷۰ درصد تخلیه رطوبتی irrigation after depletion of 70% available water	شاهد Control	19.6	6.5	248.3	18.7	29.7	55.1	1.2	0.7
	کود نیتروژنه N fertilizer (NF)	26.8	7.8	304.3	21.7	36.1	59.1	1.6	0.96
	قارچ میکوریز Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF)	34.3	12.7	421.0	26.8	43.7	68.2	1.6	1.1
	۷۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 75% NF + AMF	31.4	11.3	391.7	24.95	41.4	65.7	1.6	1.1
	۵۰ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 50% NF + AMF	30.5	11.2	405.5	25.7	40.2	65.6	1.6	1.1
	۲۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز 25% NF + AMF	28.2	9.5	425.3	27.0	38.5	62.9	1.6	1.04
	LSD (5%)	2.3	1.4	66.7	1.8	2.9	2.997	0.189	0.21

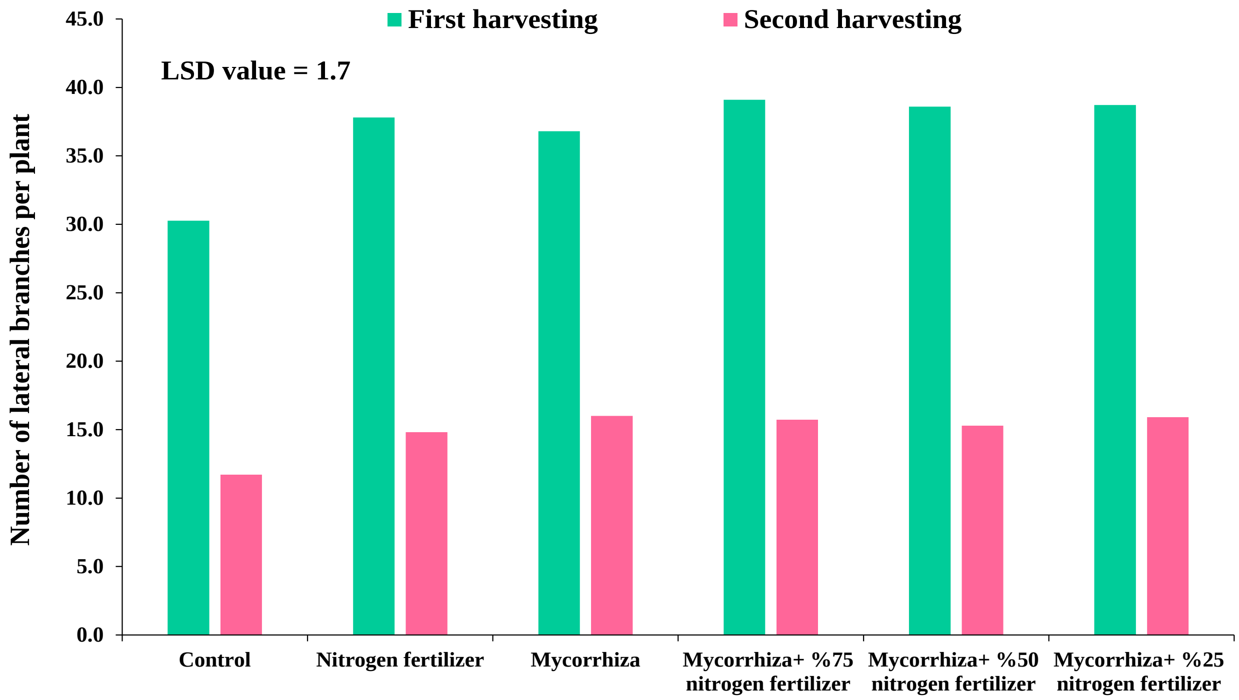
تعداد برگ در بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر کود، اثر چین و اثر متقابل تنش × کود در سطح احتمال یک درصد و اثر ساده تنش و اثر متقابل چین × تنش در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد برگ در بوته معنی‌دار گردید (جدول ۲). بیشترین میزان تعداد برگ در هر بوته (۵۶۵/۲) در آبیاری نرمال با ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه و ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز در آبیاری نرمال نداشت، همچنین کمترین میزان تعداد برگ در بوته (۲۴۸/۳) در تنش شدید بدون مصرف کود به‌دست آمد (جدول ۳). علاوه‌براین، بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین تعداد برگ در هر بوته در چین اول و در آبیاری نرمال به‌دست آمد (جدول ۴). در پژوهشی با بررسی تأثیر تداخل علف‌های هرز و تراکم‌های مختلف کاشت روی خصوصیات مورفولوژیکی نعناع‌فلفلی در دو چین گزارش کردند که چین اول منجر به افزایش ۳۳/۱ درصدی تعداد برگ نسبت به چین دوم گردید (Gity & Raoofy, 2017). تنش کم‌آبی گسترش ریشه را متأثر خواهد ساخت. احتمالاً نسبت وزن خشک ریشه به اندام‌های هوایی از طریق تعادل بین جذب آب توسط ریشه و انجام فتوسنتز به‌وسیله اندام‌های هوایی کنترل می‌شود. توسعه اندام‌های هوایی تا وقتی ادامه خواهد یافت که جذب آب توسط ریشه انجام شود. در اثر تنش خشکی توسعه برگ و فتوسنتز کاهش خواهد یافت و در نتیجه، مواد فتوسنتزی کمتری به ریشه انتقال خواهد یافت و با افزایش خشکی نوک ریشه تورژسانس خود را از دست خواهد داد (Taiz & Zeiger, 2002). قارچ میکوریز از طریق تنظیم سطح اکسین موجب افزایش تعداد ریشه‌های جانبی در گیاه می‌شود که در نتیجه آن تسهیل در کشف مناطق جدید در خاک، افزایش کارایی مصرف آب، افزایش مساحت سطح ریشه برای جذب آب و عناصر غذایی و افزایش ظرفیت فتوسنتزی گیاه می‌شود (Ludwig-Müller, 2010). همچنین، اثر کود نیتروژن در تعداد برگ به نقش نیتروژن در متابولیسم گیاه مربوط می‌شود، زیرا نیاز گیاه را از لحاظ نیتروژن تأمین می‌کند و موجب افزایش فرآورده‌های فتوسنتزی و در نتیجه، افزایش رشد رویشی، مانند تعداد و سطح برگ می‌شود. در پژوهشی با کاربرد قارچ میکوریز روی مریم‌گلی گزارش کردند که کاربرد قارچ میکوریز منجربه افزایش ۲۲۸/۵ درصدی تعداد برگ نسبت به عدم مصرف کود گردید (Tarraf et al., 2017). همچنین در مطالعه‌ای دیگر با بررسی سطوح مختلف تنش آبی و کاربرد قارچ میکوریز (*Glomus intraradices*) روی همیشه بهار (*Calendula officinalis* L.) گزارش کردند که بیشترین تعداد برگ در هر بوته در آبیاری نرمال به‌دست آمد. همچنین کاربرد قارچ میکوریز منجر به افزایش ۱۰/۶ درصدی تعداد برگ نسبت به شاهد گردید (Moghadasan et al., 2016).

تعداد شاخه جانبی در هر بوته

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثر چین، اثر کود، اثر متقابل تنش × کود و اثر متقابل چین× کود در سطح احتمال یک درصد و اثر متقابل چین × تنش در سطح احتمال پنج درصد بر تعداد شاخه جانبی در هر بوته معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین تعداد شاخه جانبی در بوته (۲۹/۸) در آبیاری نرمال با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه در آبیاری نرمال، کاربرد تلفیقی ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، کاربرد قارچ میکوریز، و کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز در تنش ملایم نداشت، همچنین کمترین تعداد شاخه جانبی در بوته (۱۸/۷) در تنش شدید و در تیمار عدم مصرف کود به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین تعداد شاخه جانبی در هر بوته در چین اول و در آبیاری نرمال به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تنش ملایم در چین اول نداشت (جدول ۴). بیشتر بودن تعداد شاخه جانبی در چین اول به‌دلیل بهینه بودن شرایط رشدی از قبیل طول روز و تابش آفتاب، دمای محیط و همچنین زیاد بودن طول دوره رشدی گیاه در چین اول (۹۳ روز بعد از کاشت) نسبت به چین دوم (۶۰ روز بعد از برداشت اول) می‌باشد (Amani Machiani et al., 2018b). علاوه‌براین، بر اساس نتایج اثر متقابل چین × کود، بیشترین تعداد شاخه جانبی در بوته در چین اول با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با تیمارهای ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه در چین اول نداشت (شکل ۴). قارچ میکوریز جذب آب در شرایط تنش خشکی را از طریق بهبود هدایت روزنه‌ای و تورژسانس برگ با دسترسی مؤثرتر ریشه به ذخایر آب و عناصر غذایی در خاک افزایش می‌دهد

(Varma et al., 2018). همچنین قارچ میکوریز از طریق افزایش تولید هورمون‌های محرک رشد گیاه مانند جیبرلین (تأثیر در رشد طولی سلول‌ها به‌ویژه میان‌گره‌های ساقه)، اکسین، سیتوکینین (تأثیر در تقسیم سلولی) سبب افزایش صفات رویشی از قبیل تعداد شاخه جانبی می‌گردد (Ludwig-Müller, 2010) و از طرفی، با توجه به اینکه نیتروژن نقش اساسی در ساختمان کلروفیل دارد و همچنین مهمترین عنصر در سنتز پروتئین‌ها می‌باشد و افزایش آن در شرایط مطلوب تا حد مشخصی موجب افزایش میزان پروتئین می‌گردد، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش پروتئین‌ها، گیاه به توسعه سطح برگ، تعداد شاخه فرعی و قطر ساقه می‌پردازد که در نتیجه آن افزایش مواد فتوسنتزی را به دنبال دارد (Rahmani et al., 2008). در پژوهشی با کاربرد قارچ میکوریز (*Glomus intraradices* و *Glomus mosseae*) روی ریحان تحت شرایط تنش آبی گزارش کردند که با افزایش تنش آبی ارتفاع، تعداد شاخه جانبی و عملکرد ماده خشک کاهش یافت. به‌طوری‌که بیشترین تعداد شاخه جانبی در آبیاری نرمال با کاربرد قارچ میکوریز به‌دست آمد (Aslani et al., 2011). در مطالعه‌ای دیگر گزارش کردند که کاربرد قارچ میکوریز (*Glomus interradices*) روی زیره سبز (*Cuminum cyminum* L.) منجر به افزایش ۳۰/۴ درصدی تعداد شاخه جانبی در هر بوته نسبت به شاهد گردید (Haghir Ebrahimabadi et al., 2018). در پژوهشی با بررسی تأثیر تراکم و تاریخ کشت روی گیاه دارویی وسمه (*Indigofera tinctoria* L.) گزارش کردند که چین اول نسبت به چین دوم منجر به افزایش ۵۷/۶ درصدی تعداد شاخه جانبی در هر بوته گردید (Modafe Behzadi et al., 2019).



شکل ٤- مقایسه میانگین اثر متقابل چین و منابع کودی مختلف بر تعداد شاخه جانبی در هر بوته نعناع فلفلی

Fig. 4- Means comparison of the interaction effect of harvesting time and different fertilizer resources on the number of lateral branches per plant of *Mentha piperita* L.

شاخص کلروفیل

اثر کود، اثر چین و اثر متقابل تنش × کود در سطح احتمال یک درصد و اثر تنش و اثر متقابل چین × تنش در سطح احتمال پنج درصد بر شاخص کلروفیل معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین میزان شاخص کلروفیل (۵۳/۹) در آبیاری نرمال با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و قارچ میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کاربرد ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه در آبیاری نرمال نداشت، همچنین کمترین میزان شاخص کلروفیل (۲۹/۷) در تنش شدید و در تیمار

عدم مصرف کود به‌دست آمد (جدول ۳). همچنین بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش، بیشترین میزان شاخص کلروفیل در چین اول و آبیاری نرمال به‌دست آمد (جدول ۴). در آزمایشی چین اول منجر به افزایش ۲۱/۷ درصدی شاخص کلروفیل نسبت چین دوم گردید (Ostadi et al., 2020). کلروفیل جزء مهمی از رنگدانه‌های فتوسنتزی می‌باشد. محتوای کلروفیل در کانوپی گیاهان ارتباط نزدیکی با فتوسنتز، میزان عناصر غذایی و بهره‌وری محصول دارد. تنش خشکی تأثیر مهمی روی آنزیم‌های درگیر در چرخه کالوین و رنگدانه‌های فتوسنتری می‌گذارد. تنش خشکی شدید باعث تولید انواع گونه‌های فعال اکسیژن می‌گردد که می‌تواند منجر به پراکسیداسیون لیپیدها، آسیب به کلروپلاست و در نتیجه، تخریب کلروفیل شود (Shivakrishna et al., 2018). با توجه به اینکه هر مولکول کلروفیل دارای چهار اتم نیتروژن می‌باشد و با توجه به همبستگی مثبت محتوای کلروفیل با میزان نیتروژن در دسترس گیاه می‌توان بیان کرد که با افزایش جذب نیتروژن میزان کلروفیل گیاه افزایش می‌یابد (Mao et al., 2020). علاوه‌براین، قارچ میکوریز با افزایش مساحت ریشه باعث جذب عناصر غذایی به‌ویژه فسفر و نیتروژن می‌گردد که در نتیجه آن باعث افزایش مساحت سطح برگ، کارایی کربوکسیلاسیون، محتوای کلروفیل و کارایی فتوسنتز گیاه خواهد شد (Begum et al., 2019).

در پژوهشی با بررسی رژیم‌های مختلف آبیاری (۴، ۸ و ۱۲ روز یک‌بار) و کاربرد قارچ میکوریز (*Glomus intraradices* و *G. mosseae*) روی گیاه ریحان گزارش شد که بیشترین و کمترین میزان شاخص کلروفیل به‌ترتیب در دوره‌های آبیاری ۴ و ۱۲ روز به‌دست آمد. همچنین کاربرد دو گونه قارچی منجر به افزایش شاخص کلروفیل نسبت به شاهد گردید (Aslani et al., 2010). در پژوهشی دیگر با بررسی اثر منابع مختلف کودی در شرایط تنش و بدون تنش روی دو توده بومی مرزه (*Satureja hortensis* L.) گزارش کردند که تنش خشکی باعث کاهش عملکرد گیاه، شاخص کلروفیل و عملکرد اسانس گردید. بیشترین شاخص کلروفیل در شرایط بدون تنش به‌دست آمد که نسبت به شرایط تنش ۲۰/۷ درصد افزایش یافت (Akrami Nejad et al., 2015).

عملکرد وزن خشک

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که اثرات اصلی تنش، کود، چین، اثر متقابل تنش × کود و اثر متقابل چین × تنش بر عملکرد وزن خشک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار گردید (جدول ۲). بیشترین عملکرد وزن خشک (۱۰۲/۳ گرم در مترمربع) در آبیاری نرمال با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه در آبیاری نرمال نداشت، همچنین کمترین میزان عملکرد وزن خشک (۵۵/۱ گرم در مترمربع) در تنش شدید بدون مصرف کود به‌دست آمد (جدول ۳). علاوه‌براین، بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین عملکرد وزن خشک در چین اول و در آبیاری نرمال به‌دست آمد (جدول ۴). کاهش در عملکرد وزن خشک با افزایش تنش کم‌آبی ممکن است به‌دلیل تخصیص ترجیحی و بیشتر مواد به ریشه‌ها به‌دلیل محدود شدن رطوبت در خاک و یا کاهش محتوای کلروفیل و در نتیجه، کاهش کارایی فتوسنتزی باشد (Govahi et al., 2015). با کاهش رطوبت خاک، تحرک عناصر غذایی به ویژه فسفر و سایر عناصر غذایی کمتر شده و در نتیجه، دسترسی گیاه به منابع غذایی کاهش خواهد یافت. زیرا عناصر غیرمتحرک از قبیل فسفر در شرایط خشکی به ذرات رس موجود در خاک چسبیده و به‌میزان کمتری در اختیار ریشه قرار می‌گیرد. همچنین، غلظت فسفر در محلول خاک کمتر از ۱۰ میکرومولار می‌باشد، زیرا فسفر در pH بالا و پایین به‌ترتیب با کلسیم و آلومینیوم رسوب می‌کند. این حلالیت کم در محلول خاک همچنین منجر به انتقال کمتر فسفر به‌سمت اپیدرم ریشه می‌شود بنابراین، یکی از دلایل کاهش صفات رشدی گیاهان در شرایط تنش خشکی به کاهش جذب عناصر غذایی نسبت داده می‌شود که به تبع آن بیومولکول‌های اساسی رشد گیاه تحت تأثیر قرار گرفته و در نهایت، منجر به کاهش رشد گیاه در این شرایط خواهد شد (Hussain et al., 2018). قارچ میکوریز با آزادسازی یون هیدروژن و اسیدی کردن ریزوسفر و ترشح فسفاتاز به داخل خاک باعث می‌شود تا فسفات غیرمحلول و تثبیت شده در خاک به‌فرم محلول درآید و برای ریشه قابل جذب گردد (Varma et al., 2018). همچنین قارچ میکوریز می‌تواند بخش اندکی از نیتروژن مورد نیاز گیاه را تأمین کند. نیتروژن محدود شده در مواد آلی معمولاً در ترکیب پپتیدها، پروتئین‌ها و اسیدهای آمینه آزاد وجود دارد که قارچ میکوریز با ترشح پپتیداز[1] و پروتئاز[2] به داخل خاک باندهای نیتروژن ارگانیکی را شکسته، سپس

1- Peptidases
2- Proteases

مونومرهـای نیتـروژن‌دار را جـذب مـی‌کنـد (Behie et al., 2012). علاوه‌براین، بیشتر بودن وزن خشـک در ۷۵ درصـد کـود نیتروژنـه + میکوریز را می‌توان به نقش نیتروژن در افزایش ماده خشک و افزایش طـول دوره رشـدی نسـبت داد، زیـرا نیتـروژن بـا افـزایش تقسـیم و تورژسـانس سـلول‌هـای مریسـتمی باعـث افـزایش رشـد رویشـی و شاخه‌دهی در گیاهان می‌شود. علاوه‌براین، زمانی که نیتروژن کافی در دسترس گیاه باشد، میزان فتوسنتز افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش رشد و زیست‌توده گیاه مـی‌گـردد. عـلاوه‌بـراین کـاربرد کـود شیمیایی نیتروژنه جذب و تجمع عناصر دیگر مانند فسفر و پتاسـیم را هم افزایش می‌دهد (Baranauskienė et al., 2003). در پژوهشی با بررسی سطوح مختلف تنش آبی روی گیاه مریم گلی لوله‌ای (*Salvia macrosiphon* Boiss.) گزارش کردند که با افزایش تنش آبی، وزن خشک اندام‌های هوایی کاهش یافت، به‌طوری‌که بیشترین میـزان آن در آبیاری نرمال به‌دست آمد که تفـاوت معنـی‌داری بـا تـنش ملایـم نداشـت (Sodaeizadeh & Mansouri, 2014). همچنـین در مطالعـه‌ای بـا بررسـی تـأثیر کـاربرد کودهـای زیسـتی، نیتـروژن و آزوکمپوست روی گیاه بادرشبی گزارش کردند که کود نیتروژن باعـث افزایش عملکرد ماده خشک گردیـد (Yousefzadeh et al., 2016). علاوه‌براین با بررسی اثر کودهای بیولوژیک روی مرزه گزارش کردند که چین اول منجر به افزایش ۸/۷ درصد عملکرد بیولوژیک نسبت به چین دوم گردید (Rezvani Moghaddam et al., 2013).

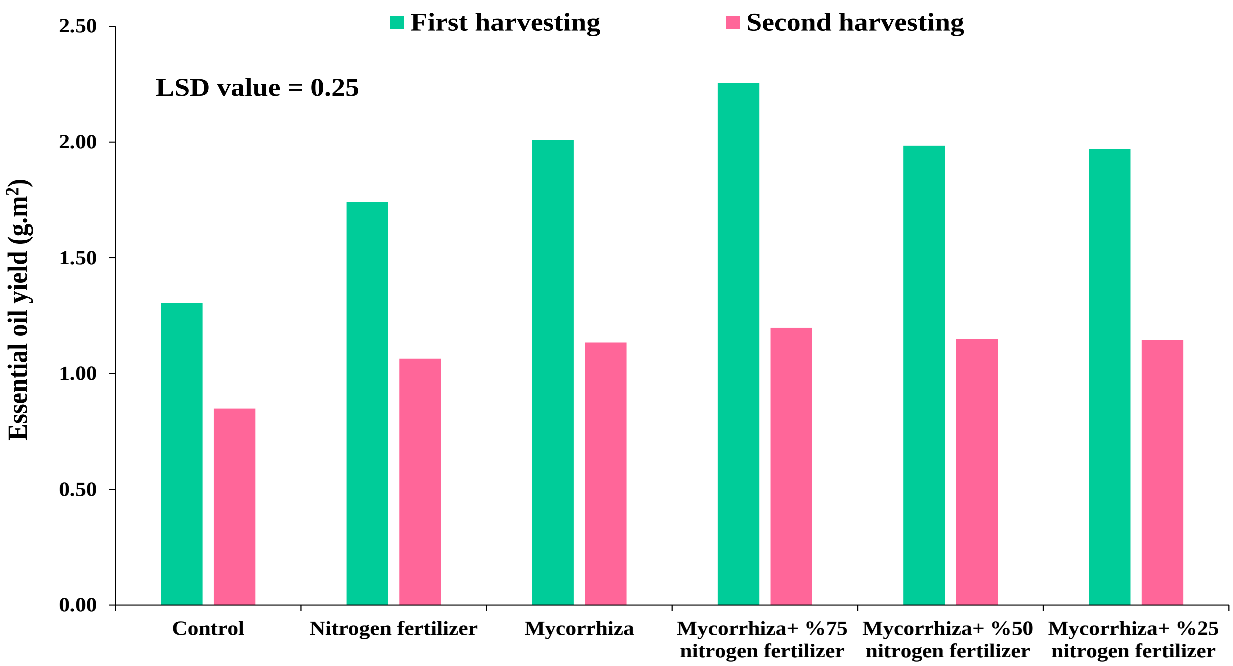
درصد و عملکرد اسانس

نتایج تجزیه واریانس نشان داد کـه درصـد اسـانس تحـت تـأثیر معنی‌دار اثرات اصلی تنش، کود و چین در سطح احتمال یک درصـد و اثرات متقابل تنش × کود و چین × تنش در سطح احتمال پنج درصـد قرار گرفت (جدول ۲). بیشترین میزان درصد اسانس (۲/۴ درصـد) در تنش ملایم با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + قارچ میکـوریز به‌دست آمد که تفاوت معنی‌داری با کـاربرد قـارچ میکـوریز در همـان سطح آبیاری نداشت، همچنین کمتـرین میـزان درصـد اسـانس (۱/۲ درصد) در تنش شدید و بدون مصرف کود به‌دست آمد (جـدول ۳). در پژوهشی بیشترین درصد، عملکرد اسانس و ترکیبـات اصـلی اسـانس (لینالول، آلفا پینن، گاما تـرپینن، ژرانیـول اسـتات و کـامفور) گشـنیز (*Coriandrum sativum* L.) در تنش آبی ملایم (۶۰ درصد ظرفیت زراعی) به‌دست آمد (Ahmadian & Nourzad, 2014). علاوه‌براین، بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین درصد اسانس در چین اول و در تنش ملایم به‌دست آمد (جدول ۴). نعنـاع فلفلـی یـک گیاه روزبلند بوده و در طی روزهای بلند و گرم حداکثر اسانس را تولید می‌کند. کمتر بودن میزان اسانس در چین دوم نسبت بـه چـین اول را می‌توان به کاهش دما و کوتاه بودن طول روز در چین دوم نسـبت داد که تأثیر منفی بر غدد تشکیل‌دهنده اسانس و میزان اسانس تولید شده خواهد داشت (Aflatuni et al., 2006). میزان تولید اسانس و به تبع آن تولید ترکیبات ترپنی در گیاهان دارویی تحت تأثیر منفی دماهـای پایین و بارندگی قرار می‌گیرد. به‌طوری‌که بارنـدگی و کـاهش دمـا در طـی دوره رشـد گیـاه داروی اسـطوخودوس (*Lavandula angustifolia* L.) منجر به کـاهش میـزان اسـانس شـد کـه دلیـل کاهش اسانس تولید شده در این شرایط را به تخریـب غـدد ترشـحی اسانس و کاهش اندازه آن‌ها نسبت دادند (Hassiotis et al., 2014).

اثرات اصلی تنش، کود، چین و اثر متقابل چین × تنش در سـطح احتمال یک درصد و اثرات متقابل تنش× کود و چین × کود در سـطح احتمال پنج درصد بر عملکرد اسانس معنی‌دار شد (جدول ۲). بیشترین (۲/۲ گرم در مترمربـع) و کمتـرین (۰/۷ گـرم در مترمربـع) عملکـرد اسانس به‌ترتیب در آبیاری نرمال با کاربرد ۷۵ درصد کـود نیتروژنـه + میکوریز و در تنش شدید بدون مصرف کود به‌دست آمـد (جـدول ۳). همچنین بر اساس نتایج اثر متقابل چین × تنش آبی، بیشترین میـزان عملکرد اسانس در چین اول و در آبیاری نرمال به‌دسـت آمـد (جـدول ۴). علاوه‌براین بیشترین میزان عملکرد اسانس با کـاربرد تلفیقـی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز در چین اول به‌دست آمـد کـه تفـاوت معنی‌داری با تیمار قارچ میکوریز در چین اول نداشت (شکل ۵). بهبود اسانس نعناع فلفلـی بـا کـاربرد قـارچ میکـوریز بـه افـزایش فعالیـت فتوسنتزی و غدد تشکیل‌دهنده اسانس بر اثر افزایش سـطح جـذب و دسترسی به عناصر غذایی نسـبت داده مـی‌شـود. بـه نظر مـی‌رسـد هم‌زیستی ریشه گیاه نعناع‌فلفلی با قارچ میکـوریز از طریـق فراهمـی عناصر اصلی سازنده اسانس از جمله نیتروژن، فسفر موجـب افـزایش درصد اسانس نعناع فلفلی شده است (Golubkina et al., 2020). در پژوهشی نتیجه گرفتند که کاربرد قارچ میکوریز باعث ایجاد تغییراتـی در غلظت فیتوهورمون‌های گیاهی از قبیل جاسمونیک اسید، ژیبرلیک اسید و سیتوکینن می‌شود که این فیتوهورمون‌ها، تشکیل غدد ترشح کننده اسانس را بیشتر و در نهایت، منجر به تولید بیشتر متابولیت‌های ثانویه می‌شوند (Kapoor et al., 2017). معمـولاً تشـکیل و تجمـع

اسانس در گیاهان دارویی در شرایط نامساعد محیطی تمایل به افزایش نشان می‌دهد که این امر از گیاه در مقابل آسیب‌های نوری زیاد و کمبود احتمالی آب محافظت می‌کند (Ghasemi et al., 2015). محصولات دارویی برخلاف همه محصولات کشاورزی که در شرایط تنش خشکی از نظر تولید صدمه می‌بینند، ممکن است در این اوضاع تولید مواد شیمیایی بیشتر و در نتیجه، بازدهی اقتصادی بالاتری پیدا کنند. تولید متابولیت‌های ثانویه برای سازگاری گیاه نسبت به عوامل نامساعد و تنش‌های محیط زندگی صورت گرفته و به منزله به‌کار افتادن یک نوع جریان دفاعی در جهت استمرار تعادل فعالیت‌های حیاتی به حساب می‌آید (Ghaemi et al., 2019). علی‌رغم اینکه میزان اسانس نعناع فلفلی در تنش ملایم نسبت به شاهد افزایش یافته است، ولی میزان اسانس تولید شده در تنش شدید نسبت به تنش ملایم کاهش پیدا کرده است. زیرا در تنش‌های شدیدتر گیاه بیشتر مواد فتوسنتزی تولید شده را صرف تولید ترکیب‌های تنظیم‌کننده اسمزی از جمله پرولین، گلیسین بتائین و ترکیبات قندی مانند ساکارز، فروکتوز و فروکتان‌ها می‌کند تا از این طریق شرایط لازم برا بقای حیات گیاه در تنش‌های شدیدتر فراهم شود (Khorasaninejad et al., 2015). در مطالعه‌ای بیشترین درصد اسانس آویشن باغی در تنش آبی ملایم و پس از آن در تنش شدید حاصل شد که به‌ترتیب ۳۸/۲ و ۲۳/۷ درصد بیشتر از آبیاری نرمال بود. همچنین درصد و عملکرد اسانس در چین اول به‌ترتیب ۴۳/۵ و ۷۲ نسبت به چین دوم افزایش یافت. در بین سطوح مختلف آبیاری، بیشترین و کمترین میزان تیمول، گاماترپینن و پاراسایمن به‌ترتیب در آبیاری ملایم و آبیاری نرمال مشاهده شد. همچنین، با کاربرد قارچ *Funneliformis mosseae* میزان ترکیبات ذکر شده ۳/۸، ۶/۹ و ۷/۱ درصد نسبت به عدم مصرف افزایش یافتند (Amani Machiani et al., 2021).

از آنجایی که عملکرد اسانس از حاصل ضرب عملکرد ماده خشک در میزان اسانس تولید شده توسط گیاه به‌دست می‌آید و با دو شاخص ذکر شده رابطه مستقیمی دارد. لذا هر عاملی که منجر به افزایش دو شاخص ذکر شده گردد منجر به افزایش عملکرد اسانس نیز خواهد شد (Zheljazkov et al., 2009). بنابراین، دلیل کاهش عملکرد اسانس در چین دوم را می‌توان به کاهش عملکرد ماده خشک و میزان اسانس تولید شده چین دوم نسبت به چین اول نسبت داد (Amani Machiani et al., 2017).



شکل ۵- مقایسه میانگین اثر متقابل چین و منابع کودی مختلف بر عملکرد اسانس نعناع فلفلی

Fig. 5- Means comparison of the interaction effect of harvesting time and different fertilizer resources on essential oil yield of *Mentha piperita* L.

ترکیبات اسانس

با تجزیه اسانس نعناع فلفلی، ۲۹ ترکیب شناسایی شد که ۹۳/۳ تا ۹۷/۴ درصد از کل ترکیبات را شامل می‌شود. در بین ترکیبات اسانس منتول (۳۱/۸ تا ۳۷/۴ درصد)، منتون (۱۲/۲ تا ۱۵/۴ درصد)، ۸ و۱ سینئول (۵/۴ تا ۶/۴ درصد)، منتوفوران (۳/۷ تا ۴/۵ درصد)، نئوایزو- منتول (۲ تا ۳/۵ درصد)، نئومنتول (۳/۸ تا ۴/۳ درصد) و دلتا-ترپینئول (۲/۱ تا ۲/۵ درصد) ترکیبات غالب اسانس بودند (جداول ۵، ۶ و ۷). بیشترین (۳۷/۴ درصد) و کمترین (۳۱/۸ درصد) میزان منتول به‌ترتیب در تنش ملایم با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه و در آبیاری نرمال به‌دست آمد. کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌ترتیب منجر به افزایش ۶/۲ و ۳/۸ درصدی منتول نسبت تیمارهای ۱۰۰ کود نیتروژنه و شاهد گردید. همچنین تنش ملایم نسبت به آبیاری نرمال و تنش شدید به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۰/۳ و ۶/۶ درصدی منتول شد. همچنین بیشترین (۱۵/۴ درصد) و کمترین (۱۲/۲ درصد) میزان منتون به‌ترتیب در آبیاری نرمال با کاربرد تلفیقی ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و تنش شدید و عدم مصرف کود به‌دست آمد. کاربرد تلفیقی ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز به‌ترتیب منجر به افزایش ۹/۰۲ و ۲/۸ درصد منتون نسبت به عدم مصرف کود و کاربرد ۱۰۰ درصد کود نیتروژنه گردید. مقایسه میزان ترکیبات ترپنی اسانس نعناع فلفلی در جدول ۸ ارائه شده است. بیشترین میزان مونوترپن‌های هیدروکربنه و مونوترپن‌های اکسیژنه به‌ترتیب در آبیاری نرمال با کاربرد تلفیقی ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز و تنش ملایم با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز مشاهده شد. همچنین بیشترین میزان سزکوئی‌ترپن‌های هیدروکربنه و اکسیژنه به‌ترتیب در تنش شدید با عدم مصرف کود و تنش ملایم با کاربرد تلفیقی ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز مشاهده شد. (جدول ۸). به‌طور کلی، ترکیبات اسانس نعناع‌فلفلی تحت تأثیر فاکتورهای محیطی مثل دوره نوری، دما، روشنایی و فاکتورهای زراعی مثل تیمارهای خاکی، مواد غذایی و یا عناصر کم مصرف قرار می‌گیرد که می‌تواند تغییراتی را در نوع و مقدار ترکیب‌های اسانس بوجود آورد (Zheljazkov et al., 2009). با افزایش کم‌آبی، بیوسنتز ترکیب‌های ثانویه کاهش می‌یابد که در نتیجه آن محتوای اسانس تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در اثر کم آبی شدید به‌دلیل مختل شدن چرخه کالوین، فرآیند اکسایش و کاهش اکی والانت $NADP^+$ به‌عنوان پذیرنده الکترون در زنجیره انتقال، کاهش می‌یابد در نتیجه مقادیر زیادی H^+ و NADPH در سلول تجمع پیدا کرده و با ادامه این روند مقدار NADPH بیش از حد کاهش می‌یابد. در نهایت، الکترون در زنجیره انتقال به اکسیژن رسیده و باعث تولید انواع گونه‌های فعال اکسیژن می‌شود. H^+ و NADPH در بیوسنتز ترکیبات ثانویه مثل فنول‌ها، ترپنوئیدها، آلکالوئیدها، گلیکوزیدهای سیانوژیک و گلوکوزینولات که درصد و محتویات اسانس را در گیاه معطر تحت تأثیر قرار می‌دهند، مورد استفاده قرار می‌گیرند (García-Caparrós et al., 2019). چنین به نظر می‌رسد دلیل افزایش ترکیبات غالب اسانس نعناع‌فلفلی در تنش‌های ملایم و شدید تخصیص بیشتر کربن‌های تثبیت شده طی فرآیند فتوسنتز به تولید متابولیت‌های ثانویه باشد که طی این فرآیند میزان مقاومت گیاهان در برابر تنش‌های محیطی از طریق کاهش خسارت گونه‌های فعال اکسیژن افزایش می‌یابد (Farahani et al., 2009). همچنین نتایج نشان داد که میزان ترکیبات غالب اسانس نعناع فلفلی با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + قارچ میکوریز افزایش یافت. لذا می‌توان نتیجه گرفت که کیفیت اسانس نعناع‌فلفلی تحت این شرایط بهبود پیدا کرده است. اسانس‌ها ترکیب‌های ترپنوئیدی بوده و واحدهای سازنده آن ها (ایزوپرنوئیدها) مانند ایزوپنتنیل پیروفسفات و دی متیل آلیل پیروفسفات، نیاز به ترکیباتی از قبیل ATP و NADPH دارند. با توجه به این موضوع که حضور عناصری نظیر نیتروژن و فسفر برای تشکیل ترکیب‌های نامبرده شده ضروری می‌باشد (Ormeno & Fernandez, 2012). از این رو همزیستی میکوریزیی ازطریق جذب کارآمد فسفر و تا حدودی نیتروژن توسط ریشه، موجب افزایش ترکیبات اسانس و به تبع آن درصد اسانس تولیدی خواهد شد. در پژوهشی با بررسی سطوح مختلف تنش کم آبی روی نعناع‌فلفلی گزارش کردند که با افزایش تنش آبی درصد اسانس کاهش یافت. به‌طوری‌که بیشترین میزان درصد اسانس در تنش ملایم بدست آمد. همچنین بیشترین میزان منتول در تنش متوسط به‌دست آمد (Abdi et al., 2019). در مطالعه‌ای دیگر با کاربرد سویه‌های مختلف قارچ میکوریز (*Glomus intraradices* و *G. mosseae*)، فسفر و تنش آبی روی گیاه بادرشبو گزارش شد که بیشترین میزان درصد اسانس در تنش آبی ملایم و تلقیح با *G. mosseae* و مصرف فسفر بدست آمد.

جدول ٤- مقایسات میانگین اثر متقابل دوره‌های آبیاری و چین بر ارتفاع بوته، تعداد گره در هربوته، تعداد برگ در هر بوته، تعداد شاخه جانبی در هر بوته، شاخص کلروفیل، عملکرد وزن خشک، درصد اسانس و عملکرد اسانس نعناع فلفلی

Table 4- Means comparison of interaction effects of irrigation levels and harvesting time on plant height, number of nod per plant, number of leaves per plant, number of lateral branches per plant, leaf greenness (SPAD index), dry matter yield, essential oil content and yield of *Mentha piperita* L.

	تیمارها Treatments	ارتفاع بوته Plant height (cm)	تعداد گره در هر بوته Number of nod per plant	تعداد برگ در هر بوته Number of leaves per plant	تعداد شاخه جانبی در هر بوته Number of lateral branches per plant	شاخص کلروفیل Leaf greenness (SPAD index)	عملکرد وزن خشک Dry matter yield ($g.m^{-2}$)	درصد اسانس Essential oil content (%)	عملکرد اسانس Essential oil yield ($g.m^{-2}$)
چین اول First harvesting	آبیاری بعد از ۳۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 30% available water,	47.8	18.6	710.3	37.6	52.9	107.7	2.2	2.4
	آبیاری بعد از ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 50% available water	42.03	16.6	575.9	37.58	47.1	81.05	2.5	2.0
	آبیاری بعد از ۷۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 70% available water	40.2	14.4	513.9	35.5	41.6	69.1	1.8	1.2
چین دوم Second harvesting	آبیاری بعد از ۳۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 30% available water,	20.9	6.1	260.8	16.3	44.5	78.4	1.6	1.3
	آبیاری بعد از ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 50% available water	19.4	5.4	214.0	15.7	40.9	66.9	1.8	1.2
	آبیاری بعد از ۷۰ درصد تخلیه رطوبتی Irrigation after depletion of 70% available water	16.8	5.2	218.2	12.8	34.9	56.4	1.3	0.08
	LSD (5%)	1.75	1.16	74.46	1.18	2.84	6.04	0.16	0.18

همچنین بیشترین میزان ترکیبات ژرنیل فورمات، ژرانیل استات و کاریوفیلین اکسید در تنش ملایم و با کاربرد قارچ *Glomus intraradices* به‌دست آمد (Fadaee et al., 2018). همچنین در پژوهشی دیگر قارچ میکوریز (*Glomus intraradices*، *G. mosseae* و *G. fasciculatum*) با افزایش میزان درصد لینالول، متیل چاویکول، نیرال و ژرانیال منجر به بهبود کیفیت اسانس گیاه ریحان نسبت به شاهد شد (Zolfaghari et al., 2013). همچنین در مطالعه‌ای دیگر که روی نعناع انجام شد، مشخص گردید که کاربرد قارچ میکوریز (*Rhizophagus clarus*) منجر به بهبود کمیت و کیفیت اسانس گردید. به‌طوری‌که بیشترین میزان کارون با کاربرد قارچ میکوریز به‌دست آمد (Urcoviche et al., 2015).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با افزایش سطح تنش رطوبتی، مقادیر ارتفاع بوته، تعداد گره، تعداد برگ، تعداد شاخه جانبی در بوته، شاخص کلروفیل و عملکرد وزن خشک کاهش معنی‌داری پیدا کردند، ولی کاربرد قارچ میکوریز منجر به کاهش اثرات سوء تنش خشکی گردید. به‌طوری‌که در آبیاری بعد از ۷۰ درصد تخلیه رطوبتی به‌عنوان تنش شدید، کاربرد قارچ میکوریز به‌صورت انفرادی و تلفیقی با کود نیتروژنه توانست منجر به افزایش این صفات نسبت به عدم مصرف گردد. علاوه‌براین، چین اول نسبت به چین دوم به‌ترتیب منجر به افزایش ۱۲۷/۸، ۱۹۴/۶، ۱۵۹/۸، ۱۴۷/۷، ۱۷/۷ و ۳۷/۹ درصدی این صفات گردید. همچنین با افزایش سطح تنش تا سطح ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی (تنش ملایم)، درصد اسانس افزایش یافت. به‌طوری‌که در تنش ملایم نسبت به آبیاری نرمال و تنش شدید به‌ترتیب افزایش ۱۱/۴ و ۳۹/۷ درصدی اسانس مشاهده شد. علاوه‌براین، بیشترین عملکرد اسانس نعناع فلفلی با کاربرد تلفیقی ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز در چین اول حاصل شد. غالب‌ترین ترکیب اسانس (منتول) نیز در تنش ملایم با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز حاصل شد. در نهایت، با توجه به اینکه هدف اقتصادی از کشت گیاهان دارویی استخراج حداکثری ماده مؤثره می‌باشد و از آن جایی که درصد و کیفیت اسانس نعناع‌فلفلی با کاربرد ۷۵ درصد کود نیتروژنه همراه با میکوریز در آبیاری بعد از ۵۰ درصد تخلیه رطوبتی افزایش معنی‌داری پیدا کردند، لذا می‌توان آن را به‌عنوان تیمار برتر پیشنهاد داد.

جدول ۵- ترکیبات شناسایی شده اسانس نعناع فلفلی تحت تأثیر تنش آبی و منابع کودی مختلف (میانگین دو چین)

Table 5- Ingredients detected in essential oil of *Mentha piperita* affected by irrigation levels and different fertilizer sources (Average of two harvesting time)

ردیف Row	اجزای تشکیل‌دهنده اسانس Essential oil ingredients	شاخص بازداری محاسباتی Calculated retention indices	شاخص بازداری رفرنس Reference retention indices	$W_{30}F_1$	$W_{30}F_2$	$W_{30}F_3$	$W_{30}F_4$	$W_{30}F_5$	$W_{30}F_6$
1	آلفا-پینن *α*-Pinene	931	932	0.8	0.7	0.7	0.8	0.9	0.7
2	سابینن Subinene	970	969	0.7	0.6	0.6	0.7	0.8	0.6
3	بتا-پینن *β*-Pinene	975	974	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2
4	میرسین Myrcene	988	988	0.6	0.7	0.5	0.9	0.7	0.4
5	۳-اُکتانول 3-Octanol	1000	998	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
6	آلفا-ترپینن *α*-Terpinene	1017	1014	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
7	لیمونن	1029	1024	2.9	2.6	2.7	3.1	3.1	3.0

	Limonene								
8	۱و۸-سینئول 1,8-Cineole	1029	1026	6.4	5.6	6.0	5.9	6.1	5.4
9	گاما-ترپینن *γ*-Terpinene	1058	1054	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.2
10	سیس-سابینن هیدرات *Cis*-Sabinene hydrate	1066	1065	1.5	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3
11	لینالول Linalol	1103	1095	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.3
12	منتون Menthone	1152	1148	13.5	14.8	14.4	14.9	14.8	15.4
13	منتوفوران Menthofuran	1161	1159	4.4	4.3	4.2	3.8	4.2	4.2
14	دلتا ترپینئول *δ*-Terpineol	1162	1162	2.2	2.2	2.3	2.4	2.3	2.5
15	نئو-منتول *neo*-Menthol	1163	1161	3.9	3.8	4.0	4.2	4.0	4.2
16	منتول Menthol	1175	1167	32.7	31.8	34.2	33.9	33.9	34.5
17	ترپینن-۴-اُل Terpinene-4-ol	1177	1177	2.2	1.3	1.4	1.4	0.2	0.2
18	نئو-ایزو-منتول *neo*-*iso*-Menthol	1184	1184	3.1	2.7	2.9	2.2	3.2	3.5
19	پولیگون Pulegone	1236	1233	1.4	1.8	1.4	1.6	1.6	1.6
20	پیپریتون Piperitone	1252	1252	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.5
21	نئو-منتی استات *neo*-Menthy acetate	1273	1271	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6
22	پی-منت-ال-این-۹-اُل *p*-Menth-l-en-9-ol	1294	1294	10.8	12.6	10.1	10.8	10.3	10.3
23	ایزو-منتیل استات *iso*-Menthyl acetate	1307	1304	0.6	0.7	0.5	0.5	0.5	0.5
24	بتا-بوربونن *β*-bourbonene	1382	1387	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1
25	کاریوفیلین (*E*)-Caryophyllene	1416	1417	1.2	1.3	1.2	1.2	1.2	1.4
26	بتا-فارنسین (E)-*β*-Farnesene	1457	1454	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
27	جرماکرین دی Germacrene D	1479	1484	1.0	1.1	1.1	0.9	1.0	1.1
28	الیکسن Elixene	1494	1492	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
29	ویریدیفلورل Viridiflorol	1589	1592	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
	مجموع ترکیبات شناسایی شده Total identified (%)			94.6	94.6	94.3	95.2	94.9	95.4

W_{30}: آبیاری پس از ۳۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، F_1: شاهد، F_2: کود نیتروژنه، F_3: قارچ میکوریز، F_4: ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، F_5: ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، F_6: ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز

W_{30}: irrigation after depletion of 30% available water, F_1: control, F_2: nitrogen fertilizer (NF), F_3: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), F_4: 75% NF+ AMF, F_5: 50% NF+ AMF, F_6: 25% NF+ AMF

جدول ٦- ترکیبات شناسایی شده اسانس نعناع فلفلی تحت تأثیر تنش آبی و منابع کودی مختلف (میانگین دو چین)

Table 6- Ingredients detected in essential oil of *Mentha piperita* affected by irrigation levels and different fertilizer sources (average of two harvesting time)

ردیف Row	اجزای تشکیل‌دهنده اسانس Essential oil ingredients	شاخص بازداری محاسباتی Calculated retention indices	شاخص بازداری رفرنس Reference retention indices	$W_{50}F_1$	$W_{50}F_2$	$W_{50}F_3$	$W_{50}F_4$	$W_{50}F_5$	$W_{50}F_6$
1	آلفا-پینن *α*-Pinene	931	932	0.8	0.8	0.8	0.6	0.8	0.7
2	سابینن Subinene	970	969	0.5	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6
3	بتا-پینن *β*-Pinene	975	974	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1
4	میرسین Myrcene	988	988	0.4	0.8	0.7	0.7	0.8	0.4
5	۳-اُکتانول 3-Octanol	1000	998	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
6	آلفا-ترپینن *α*-Terpinene	1017	1014	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
7	لیمونن Limonene	1029	1024	3.0	2.8	2.9	2.7	2.7	2.7
8	۱و۸-سینئول 1,8-Cineole	1029	1026	6.0	6.2	6.4	5.8	6.2	5.4
9	گاما-ترپینن *γ*-Terpinene	1058	1054	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2
10	سیس-سابینن هیدرات *Cis*-Sabinene hydrate	1066	1065	1.1	1.4	1.6	1.5	1.5	1.3
11	لینالول Linalol	1103	1095	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
12	منتون Menthone	1152	1148	14.2	14.4	13.8	13.2	14.1	14.6
13	منتوفوران Menthofuran	1161	1159	4.2	4.1	4.5	3.9	3.9	3.8
14	دلتا ترپینئول *δ*-Terpineol	1162	1162	2.3	2.5	2.3	2.4	2.4	2.4
15	نئو-منتول *neo*-Menthol	1163	1161	3.9	4.0	4.0	4.1	4.0	4.3
16	منتول Menthol	1175	1167	34.1	35.0	34.0	37.4	36.9	35.4
17	ترپینن-۴-اُل Terpinene-4-ol	1177	1177	2.4	1.3	2.5	1.4	0.2	0.3
18	نئو-ایزو-منتول *neo*-*iso*-Menthol	1184	1184	2.2	2.1	2.2	3.3	3.3	3.4
19	پولیگون Pulegone	1236	1233	1.4	1.8	1.7	1.5	1.4	1.6
20	پیپریتون Piperitone	1252	1252	0.4	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5
21	نئو-منتی استات *neo*-Menthy acetate	1273	1271	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7
22	پی-منت-ال-این-۹-اُل *p*-Menth-l-en-9-ol	1294	1294	11.9	11.1	11.0	10.9	10.4	11.0
23	ایزو-منتیل استات	1307	1304	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

	iso-Menthyl acetate								
24	بتا-بوربونن *β*-bourbonene	1382	1387	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1
25	کاریوفیلین (*E*)-Caryophyllene	1416	1417	1.3	1.2	1.2	1.3	1.3	1.4
26	بتا-فارنسین (*E*)-*β*-Farnesene	1457	1454	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
27	جرماکرین دی Germacrene D	1479	1484	1.1	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1
28	الیکسن Elixene	1494	1492	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
29	ویریدیفلورل Viridiflorol	1589	1592	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
	مجموع ترکیبات شناسایی شده Total identified (%)			95.8	96.1	96.5	97.4	96.7	96.0

W_{50}: آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، F_1: شاهد، F_2: کود نیتروژنه، F_3: قارچ میکوریز، F_4: ۷۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز، F_5: ۵۰ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز، F_6: ۲۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز

W_{50}: irrigation after depletion of 50% available water, F_1: control, F_2: nitrogen fertilizer (NF), F_3: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), F_4: 75% NF+ AMF, F_5: 50% NF+ AMF, F_6: 25% NF+ AMF

جدول ۷- ترکیبات شناسایی شده اسانس نعناع فلفلی تحت تأثیر تنش آبی و منابع کودی مختلف (میانگین دو چین).

Table 7- Ingredients detected in essential oil of *Mentha piperita* affected by irrigation levels and different fertilizer sources (average of two harvesting time)

ردیف Row	اجزای تشکیل‌دهنده اسانس Essential oil ingredients	شاخص بازداری محاسباتی Calculated retention indices	شاخص بازداری رفرنس Reference retention indices	$W_{70}F_1$	$W_{70}F_2$	$W_{70}F_3$	$W_{70}F_4$	$W_{70}F_5$	$W_{70}F_6$
1	آلفا-پینن *α*-Pinene	931	932	0.6	0.8	0.7	0.7	0.7	0.8
2	سابینن Subinene	970	969	0.5	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7
3	بتا-پینن *β*-Pinene	975	974	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	1.3
4	میرسین Myrcene	988	988	0.7	0.7	0.3	0.6	0.9	1.0
5	۳-اُکتانول 3-Octanol	1000	998	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
6	آلفا-ترپینن *α*-Terpinene	1017	1014	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2
7	لیمونن Limonene	1029	1024	2.8	2.9	2.8	2.8	2.7	2.8
8	۱و۸-سینئول 1,8-Cineole	1029	1026	6.1	5.9	6.2	6.3	6.4	5.8
9	گاما-ترپینن *γ*-Terpinene	1058	1054	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3
10	سیس-سابینن هیدرات *Cis*-Sabinene hydrate	1066	1065	1.5	1.5	1.3	1.5	1.6	1.5
11	لینالول Linalol	1103	1095	1.0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4
12	منتون	1152	1148	12.2	13.0	15.0	14.3	13.8	13.3

	Menthone								
13	منتوفوران Menthofuran	1161	1159	3.9	3.8	3.8	3.9	3.7	3.7
14	دلتا ترپینئول δ-Terpineol	1162	1162	2.1	2.2	2.5	2.4	2.3	2.3
15	نئو-منتول *neo*-Menthol	1163	1161	4.0	4.1	4.2	4.2	4.3	4.1
16	منتول Menthol	1175	1167	33.5	35.9	36.0	35.1	34.4	34.6
17	ترپینن-۴-اُل Terpinene-4-ol	1177	1177	1.6	1.5	2.6	1.3	1.2	1.3
18	نئو-ایزو-منتول *neo*-*iso*-Menthol	1184	1184	2.0	2.1	2.0	2.1	3.3	2.4
19	پولیگون Pulegone	1236	1233	1.5	2.0	1.1	1.6	1.6	1.4
20	پیپریتون Piperitone	1252	1252	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
21	نئو-منتی استات *neo*-Menthy acetate	1273	1271	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8
22	پی-منت-ال-این-۹-اُل *p*-Menth-l-en-9-ol	1294	1294	11.1	9.5	8.9	12.2	11.2	12.8
23	ایزو-منتیل استات *iso*-Menthyl acetate	1307	1304	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.7
24	بتا-بوربونن β-bourbonene	1382	1387	0.9	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1
25	کاریوفیلین (*E*)-Caryophyllene	1416	1417	1.7	1.3	1.3	1.2	1.1	1.2
26	بتا-فارنسین (*E*)-β-Farnesene	1457	1454	0.8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
27	جرماکرین دی Germacrene D	1479	1484	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
28	الیکسن Elixene	1494	1492	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
29	ویریدیفلورل Viridiflorol	1589	1592	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	مجموع ترکیبات شناسایی شده Total identified (%)			93.3	94.1	95.5	97.0	96.2	96.9

W_{70}: آبیاری پس از ۷۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، F_1: شاهد، F_2: کود نیتروژنه، F_3: قارچ میکوریز، F_4: ۷۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، F_5: ۵۰ درصد کود نیتروژنه + میکوریز، F_6: ۲۵ درصد کود نیتروژنه + میکوریز

W_{70}: irrigation after depletion of 70% available water, F_1: control, F_2: nitrogen fertilizer (NF), F_3: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), F_4: 75% NF+ AMF, F_5: 50% NF+ AMF, F_6: 25% NF+ AMF

جدول ۸- درصد مونوترپن‌ها و سزکوئی‌ترپن‌های اسانس نعناع فلفلی تحت تأثیر تنش آبی و منابع کودی مختلف (میانگین دو چین)

Table 8- Monoterpenes and Sesquiterpenes percentage of essential oil of *Mentha piperita* affected by irrigation levels and different fertilizer sources (Average of two harvesting time)

گروه‌بندی ترکیبات اسانس Grouped essential oil compounds	تیمارها Treatments					
	$W_{30}F_1$	$W_{30}F_2$	$W_{30}F_3$	$W_{30}F_4$	$W_{30}F_5$	$W_{30}F_6$
مونوترپن‌های هیدروکربنه Monoterpene hydrocarbons	6.3	5.98	5.95	6.9	7.1	6.1
مونوترپن‌های اکسیژنه Oxygenated monoterpenes	84.2	84.4	84.1	84.4	83.9	84.9
سزکوئی‌ترپن‌های هیدروکربنه Sesquiterpene hydrocarbonates	3.6	3.7	3.7	3.5	3.5	3.9
سزکوئی‌ترپن‌های اکسیژنه Oxygenated sesquiterpenes	0.4	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4
ترکیبات دیگر Other compositions	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
مجموع ترکیبات شناسایی شده Total identified compounds (%)	94.6	94.6	94.3	95.2	94.9	95.4
	$W_{50}F_1$	$W_{50}F_2$	$W_{50}F_3$	$W_{50}F_4$	$W_{50}F_5$	$W_{50}F_6$
مونوترپن‌های هیدروکربنه Monoterpene hydrocarbons	6.1	6.7	6.6	6.1	6.3	5.8
مونوترپن‌های اکسیژنه Oxygenated monoterpenes	85.4	85.7	85.8	87.04	86.2	85.6
سزکوئی‌ترپن‌های هیدروکربنه Sesquiterpene hydrocarbonates	3.8	3.3	3.6	3.7	3.7	4.0
سزکوئی‌ترپن‌های اکسیژنه Oxygenated sesquiterpenes	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5
ترکیبات دیگر Other compositions	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1
مجموع ترکیبات شناسایی شده Total identified compounds (%)	95.8	96.1	96.5	97.4	96.7	96.0
	$W_{70}F_1$	$W_{70}F_2$	$W_{70}F_3$	$W_{70}F_4$	$W_{70}F_5$	$W_{70}F_6$
مونوترپن‌های هیدروکربنه Monoterpene hydrocarbons	6.2	6.6	5.9	6.2	6.4	6.97
مونوترپن‌های اکسیژنه Oxygenated monoterpenes	82.2	83.4	85.5	86.8	85.9	85.6
سزکوئی‌ترپن‌های هیدروکربنه Sesquiterpene hydrocarbonates	4.5	3.6	3.7	3.5	3.4	3.8
سزکوئی‌ترپن‌های اکسیژنه Oxygenated sesquiterpenes	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
ترکیبات دیگر Other compositions	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
مجموع ترکیبات شناسایی شده Total identified compounds (%)	93.3	94.1	95.5	97.0	96.2	96.9

W_{30}: آبیاری پس از ۳۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، W_{50}: آبیاری پس از ۵۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، W_{70}: آبیاری پس از ۷۰ درصد حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی، F_1: شاهد، F_2: کود نیتروژنه، F_3: قارچ میکوریز، F_4: ۷۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز، F_5: ۵۰ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز، F_6: ۲۵ درصد کود نیتروژنه+ میکوریز

W_{30}: irrigation after depletion of 30% available water, W_{50}: irrigation after depletion of 50% available water, W_{70}: irrigation after depletion of 70% available water, F_1: control, F_2: nitrogen fertilizer (NF), F_3: arbuscular mycorrhizal fungi (AMF), F_4: 75% NF+ AMF, F_5: 50% NF+ AMF, F_6: 25% NF+ AMF

References

Adams, R.P. (2007). *Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Mass Spectrometry*. Allured Publishing Corporation: Carol Stream, IL, USA. 804 pp.

Abdi, G., Shokrpour, M., & Salami, S.A. (2019). Essential oil composition at different plant growth development of peppermint (*Mentha x piperita* L.) under water deficit stress. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, *22*(2), 431-440. https://doi.org/10.1080/0972060X.2019.1581095

Abdollahi Arpanahi, A., & Feizian, M. (2019). Arbuscular mycorrhizae alleviate mild to mild water stress and improve essential oil yield in thyme. *Rhizosphere*, *9*, 93-96. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2018.10.003

Aflatuni, A., Sari, E.K.J.U., & Hohtola, A. (2006). Optimum harvesting time of four *Mentha* species in Northern Finland. *Journal of Essential Oil Research*, *18*(2), 134-138. https://doi.org/10.1080/10412905.2006.9699043

Ahmadian, A., & Nourzad, S. (2014). Effect of water stress and harvesting stages on quantitative and qualitative yields of coriander (*Coriandrum sativum* L.). *Journal of Agroecology*, *6*(1), 130-141. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/JAG.V6I1.35680

Akrami Nejad, O., Saffari, M., & Abdolshahi, R. (2015). Effect of organic and chemical fertilizers on yield and essential oil of two ecotypes of savory (*Satureja hortensis* L.) under normal and drought stress conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *13*(4), 675-686. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/GSC.V13I4.23866

Amani Machiani, M., Javanmard, A., & Shekari, F. (2017). The effect of intercropping patterns on peppermint (*Mentha piperita* L.) dry biomass yield and essential oil content and faba bean (*Vicia faba* L.) seed yield. *Journal of Crop Production and Processing*, *7*(3), 79-97. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.29252/jcpp.7.3.79

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M.R., & Maggi, F. (2018a). Evaluation of yield, essential oil content and compositions of peppermint (*Mentha piperita* L.) intercropped with faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Cleaner Production*, *171*, 529-537. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.062

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Morshedloo, M.R., & Maggi, F. (2018b). Evaluation of competition, essential oil quality and quantity of peppermint intercropped with soybean. *Industrial Crops and Products*, *111*, 743-754. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.052

Amani Machiani, M., Javanmard, A., Ostadi, A., Morshedloo, M.R., & Chabokpour, J. (2021). Effects of harvest time and mycorrhiza fungus application on quantitative and qualitative yield of thyme (*Thymus vulgaris* L.) essential oil at different irrigation levels. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *36*(6), 1022-1037. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22092/IJMAPR.2021.351323.2835

Aslani, Z., Hassani, A., Sadagiyani, R., Sefidkon, F., Barin, M., & Gheibi, S.A. (2010). Effect of symbiosis with mycorrhiza fungi on some physiological characteristics of basil (*Osimum basilicum*) under drought stress. *Environmental Stresses in Crop Sciences*, *2*(2), 109-117. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22077/escs.2010.70

Aslani, Z., Hassani, A., Rasooli, S.M., Sefidkon, F., & Barin, M. (2011). Effect of two fungi species of arbuscular mycorrhizal (*Glomus mosseae* and *Glomus intraradices*) on growth, chlorophyll contents and P concentration in basil (*Ocimum basilicum* L.) under drought stress conditions. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *27*(3), 471-486. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22092/IJMAPR.2011.6388

Babushok, V.I., Linstrom, P.J., Reed, J.J., Zenkevich, I.G., Brown, R.L., Mallard, W.G., & Stein, S.E. (2007). Development of a database of gas chromatographic retention properties of organic compounds. *Journal of Chromatography, A*. *1157*(1-2), 414-421. https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.05.044

Bahreininejad, B., Razmjoo, J., & Mirza, M. (2013). Influence of water stress on morpho-physiological and phytochemical traits in *Thymus daenensis*. *International Journal of Plant Production*, *7*(1), 151-166. https://doi.org/10.22069/IJPP.2012.927

Baranauskienė, R., Venskutonis, P.R., Viškelis, P., & Dambrauskienė, E. (2003). Influence of nitrogen fertilizers on the yield and composition of thyme (*Thymus vulgaris). Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *51*(26), 7751-7758. https://doi.org/10.1021/jf0303316

Begum, N., Qin, C., Ahanger, M.A., Raza, S., Khan, M.I., Ashraf, M., Ahmed, N., & Zhang, L. (2019). Role of arbuscular mycorrhizal fungi in plant growth regulation: Implications in abiotic stress tolerance. *Frontiers in Plant Science*, *10*, 1-15. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01068

Behie, S., Zelisko, P., & Bidochka, M. (2012). Endophytic insect-parasitic fungi translocate nitrogen directly from insects to plants. *Science*, *336*(1), 1576-1577. https://doi.org/10.1126/science.1222289

Bigonah, R., Rezvani Moghaddam, P., & Jahan, M. (2014). Effects of different fertilizer managements on quantitative and qualitative characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) as a medicinal plant. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *12*(4), 574-581. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/GSC.V12I4.45140

Biglari, T., Maleksaeidi, H., Eskandari, F., & Jalali, M. (2019). Livestock insurance as a mechanism for household resilience of livestock herders to climate change: Evidence from Iran. *Land Use Policy*, 87, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104043

Gheisari Zardak, S., Dehnavi, M.M., Salehi, A., & Gholamhoseini, M. (2017). Responses of field grown fennel (*Foeniculum vulgare* Mill.) to different mycorrhiza species under varying intensities of drought stress. *Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants*, *5*, 16-25. https://doi.org/10.1016/j.jarmap.2016.09.004

Chiappero, J., Del Rosario Cappellari, L., Alderete, L.G.S., Palermo, T.B., & Banchio, E. (2019). Plant growth promoting rhizobacteria improve the antioxidant status in *Mentha piperita* grown under drought stress leading to an enhancement of plant growth and total phenolic content. *Industrial Crops and Products*, *139*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111553

Clark, R.J., & Read, C. (2000). *Production of Peppermint Oil a Model of Best Practice for Tasmania and Victoria*. Rural Industries Research and Development Corporation (RIRDC) publishing: Kingston/Tasmania, Australia. 117 pp.

Egamberdieva, D., Shrivastava, S., & Varma, A. (2015). *Plant-Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Medicinal Plants*. Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany. 442 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-319-13401-7

Eslami Fard, S., Yarnia, M., Farahvash, F., Khalilvand, E., & Rashidi, V. (2019). Evaluating the role of mycorrhiza species in phosphorus levels on peppermint production under different water conditions. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *29*(3), 39-57. (In Persian with English Summary).

Fadaee, E., Parvizi, Y., Gerdakane, M., & Khan-ahmadi, M. (2018). The Effects of mycorhiza (*Glomus mosseae* and *Glomus intraradiceae*) and phosphorus on growth and phytochemical traits of *Dracocephalum moldavica* L. under drought stress. *Journal of Medicinal Plants*, *17*(66), 100-112. (In Persian with English Summary)

Farahani, H.A., Valadabadi, S.A., Daneshian, J., & Khalvati, M.A. (2009). Evaluation changing of essential oil of balm (*Melissa officinalis* L.) under water deficit stress conditions. *Journal of Medicinal Plants Research*, *3*, 329-333. https://doi.org/10.5897/JMPR.9000606

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S.M.A. (2009). Plant drought stress: Effects, mechanisms and management. *Sustainable Agriculture*, *29*, 153-188. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_12

Gao, S., Wang, Y., Yu, S., Huang, Y., Liu, H., Chen, W., & He, X. (2020). Effects of drought stress on growth, physiology and secondary metabolites of Two Adonis species in Northeast China. *Scientia Horticulturae*, *259*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108795

García-Caparrós, P., Romero, M.J., Llanderal, A., Cermeño, P., Lao, M.T., & Segura, M.L. (2019). Effects of drought stress on biomass, essential oil content, nutritional parameters, and costs of production in six Lamiaceae species. *Water*, *11*(3), 1-12. https://doi.org/10.3390/w11030573

Ghaemi, M., Zare, Z., & Nasiri, Y. (2019). Effect of drought stress on some morphological characteristics and essential oil production levels of *Ocimum basilicum* in different stages of growth and development. *Developmental Biology*, *11*(1), 15-26.

Ghasemi P.A., Ghahfarokhi, B.B., Ghahfarokhi, S.A.M., & Malekpoor, F. (2015). Chemical composition of essential oils from the aerial parts and underground parts of Iranian valerian collected from different natural habitats. *Industrial Crops and Products*, *63*, 147–151. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.10.017

Gity, S., & Raoofy, M. (2017). Yield, essential oil and some morphological characteristics of peppermint (*Mentha piperita* L.) influenced by hand weeding and plant density. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *27*(1), 13-23. (In Persian with English Summary)

Golubkina, N., Logvinenko, L., Novitsky, M., Zamana, S., Sokolov, S., Molchanova, A., Shevchuk, O., Sekara, A., Tallarita, A., & Caruso, G. (2020). Yield, essential oil and quality performances of *Artemisia dracunculus*, *Hyssopus officinalis* and *Lavandula angustifolia* as affected by arbuscular mycorrhizal fungi under organic management. *Plants*, *9*, 2-16. https://doi.org/10.3390/plants9030375

Govahi, M., Ghalavand, A., Nadjafi, F., & Sorooshzadeh, A. (2015). Comparing different soil fertility systems in sage (*Salvia officinalis*) under water deficiency. *Industrial Crops and Products*, *74*, 20-27. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.053

Haghir Ebrahimabadi, A., Hatami, M., Karimzadeh, A., & Ghorbanpour, M. (2018). Effect of mycorrhizal fungi and biophosphor fertilizer on growth features, yield and yield components, and essential oil constituents in *Cuminum cyminum* L. *Journal of Medicinal Plants*, *17*(66), 74-90. (In Persian with English Summary)

Hassiotis, C.N., Ntana, F., Lazari, D.M., Poulios, S., & Vlachonasios, K.E. (2014). Environmental and developmental factors affect essential oil production and quality of *Lavandula angustifolia* during flowering period. *Industrial Crops and Products*, *62*, 359-366. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.048

Hussain, S.A., Farooq, M.A., Akhtar, J., & Saqib, Z.A. (2018). Silicon-mediated growth and yield improvement of sunflower (*Helianthus annus* L.) subjected to brackish water stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, *40*(10), 1-11. https://doi.org/10.1007/s11738-018-2755-z

Jiang, T., Liu, J., Gao, Y., Sun, Z., Chen, S., Yao, N., Ma, H., Feng, H., Yu, Q., & He, J. (2020). Simulation of plant height of winter wheat under soil Water stress using modified growth functions. *Agricultural Water Management*, *232*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106066

Jamshidi, A.M., Ahmadi, A., Karimi, M., & Motesharezadeh, B. (2020). Evaluation of some growth and physiological

responses of chia (*Salvia hispanica* L.) to various moisture regimes. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *50*(4), 99-110. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/IJFCS.2018.260605.654491

Kapoor, R., Anand, G., Gupta, P., & Mandal, S. (2017). Insight into the mechanisms of enhanced production of valuable terpenoids by arbuscular mycorrhiza. *Phytochemistry Reviews*, *16*(4), 677-692. https://doi.org/10.1007/s11101-016-9486-9

Khalid, K.A. (2006). Influence of water stress on growth, essential oil, and chemical composition of herbs [*Ocimum* sp.]. *International Agrophysics*, *20*(4), 289-296.

Khorasaninejad, S., soltanloo, H., ramezanpour, S., hadian, J., & Atashi, S. (2015). The effect of drought stress on the growth, essential oil yield and chemical composition of lavender. *Journal of Crops Improvement*, *17*(4), 979-988. (In Persian). https://doi.org/10.22059/jci.2015.55145

Lenoir, I., Fontaine, J., & Sahraoui, A.L.H. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungal responses to abiotic stresses: A review. *Phytochemistry*, *123*, 4-15. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2016.01.002

Ludwig-Müller, J. (2010). *Hormonal responses in host plants triggered by arbuscular mycorrhizal fungi*. In H. Koltai, & Y. Kapulnik (Eds.). Arbuscular Mycorrhizas: Physiology and Function. Springer, Dordrecht, p. 169–190. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9489-6_8

Marcum, D.B., & Hanson, B.R. (2006). Effect of irrigation and harvest timing on peppermint oil yield in California. *Agricultural Water Management*, *82*(1), 118-128. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.022

Mao, Z.H., Deng, L., Duan, F.Z., Li, X.J., & Qiao, D.Y. (2020). Angle effects of vegetation indices and the influence on prediction of SPAD values in soybean and maize. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *93*, 1-14. https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102198

Modafe Behzadi, N., Rezvani Moghaddam, P., & Jahan, M. (2019). Effects of planting date and plant density on morphology and yield of indigo (*Indigofera tinctoria* L.) as a medicinal plant. *Journal of Agroecology*, *10*(4), 1067-1079. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/JAG.V10I4.48405

Moghadasan, S.H., Safipour, A.A., & Saeid, N.F. (2016). The role of mycorrhiza in drought tolerance of marigold (*Calendula officinalis* L.). *Journal of Crop Ecophysiology* *9*(4), 521-532. (In Persian with English Summary)

Morshedloo, M.R., Craker, L.E., Salami, A., Nazeri, V., Sang, H., & Maggi, F. (2017). Effect of prolonged water stress on essential oil content, compositions and gene expression patterns of mono-and sesquiterpene synthesis in two oregano (*Origanum vulgare* L.) subspecies. *Plant Physiology and Biochemistry*, *111*, 119-128. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.11.023

Morshedloo, M.R., Maggi, F., Neko, H.T., & Aghdam, M.S. (2018). Sumac (*Rhus coriaria* L.) fruit: Essential oil variability in Iranian populations. *Industrial Crops and Products*, *111*, 1-7. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.10.002

Mumivand, H. (2016). Effect of drought stress on growth, effective substances and some enzyme activities in selected tarragon (*Artemisia dracuculus* L.) accessions. PhD Dissertation, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Iran. (In Persian with English Summary)

Nadarajan, S., & Sukumaran, S. (2021). *Chemistry and toxicology behind chemical fertilizers*. In F.B. Lewu, T. Volova, S. Thomas, & K.R. Rakhimol (Eds.). Controlled Release Fertilizers for Sustainable Agriculture. Academic Press, London, United Kingdom. p. 195-229.

Peter, K. (2006). *Handbook of Herbs and Spices*. Woodhead Publishing: Sawston, UK. 537 pp.

Omidbaigi, R. (2012). *Production and Processing of Medicinal Plants (Vol.2).* Razavi Ghods Astan Publication. 438 pp.

Ormeno, E., & Fernandez, C. (2012). Effect of soil nutrient on production and diversity of volatile terpenoids from plants. *Current Bioactive Compounds*, *8*(1), 71-79. https://doi.org/10.2174/157340712799828188

Ostadi, A., Javanmard, A., Machiani, M.A., Morshedloo, M.R., Nouraein, M., Rasouli, F., & Maggi, F. (2020). Effect of different fertilizer sources and harvesting time on the growth characteristics, nutrient uptakes, essential oil productivity and composition of *Mentha x piperita* L. *Industrial Crops and Products*, *148*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112290

Ozturk, M., Turkyilmaz Unal, B., García-Caparrós, P., Khursheed, A., Gul, A., & Hasanuzzaman, M. (2020). Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*, *100*, 1-34. https://doi.org/10.1111/ppl.13297

Rahimi, Y., Taleei, A., & Ranjbar, M. (2018). Long-term water deficit modulates antioxidant capacity of peppermint (*Mentha piperita* L.). *Scientia Horticulturae*, *237*, 36-43. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.004

Rahmani, N., Valadabadi, S.A., Daneshian, J., & Bigdeli, M. (2008). The effects of water deficit stress and nitrogen on oil yield of *Calendula officinalis* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants Research*, *24*(1), 103-108. (In Persian with English Summary)

Rezvani Moghaddam, P., Aminghafori, A., Bakhshaie, S., & Jafari, L. (2013). The effect of organic and biofertilizers on some quantitative characteristics and essential oil content of summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Journal of Agroecology*, *5*(2), 105-112. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22067/JAG.V5I2.24460

Ruiz-Lozano, J.M. (2003). Arbuscular mycorrhizal symbiosis and alleviation of osmotic stress. New perspectives for

molecular studies. *Mycorrhiza*, *13*, 309–317. https://doi.org/10.1007/s00572-003-0237-6

Safahani Langeroodi, A.R., Osipitan, O.A., Radicetti, E., & Mancinelli, R. (2020). To what extent arbuscular mycorrhiza can protect chicory (*Cichorium intybus* L.) against drought stress. *Scientia Horticulturae*, *263*, 1-10. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.109109

Safikhani, F.A., Heydari, S.H., Siadat, S.A.E., Sharifi, A.E., Seyednezhad, S., & Abbaszadeh, B. (2007). The effect of drought stress on percentage and yield of essential oil and physiological characteristics of *Deracocephalum moldavica* L. *Iranian Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, *23*(1), 86-99. (In Persian with English Summary)

Seleiman, M.F., Al-Suhaibani, N., Ali, N., Akmal, M., Alotaibi, M., Refay, Y., Dindaroglu, T., Abdul-Wajid, H.H., & Battaglia, M.L. (2021). Drought stress impacts on plants and different approaches to alleviate its adverse effects. *Plants*, *10*(2), 1-25. https://doi.org/10.3390/plants10020259

Shivakrishna, P., Reddy, K.A., & Rao, D.M. (2018). Effect of PEG-6000 imposed drought stress on RNA content, relative water content (RWC), and chlorophyll content in peanut leaves and roots. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *25*(2), 285-289. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2017.04.008

Sodaeizadeh, H., & Mansouri, F. (2014). Effects of drought stress on dry matter accumulation, nutrient concentration and soluble carbohydrate of *Salvia macrosiphonas* a medicinal plant. *Arid Biome Scientific and Research Journal*, *4*(1), 1-9. (In Persian with English Summary)

Solanki, P., Bhargava, A., Chhipa, H., Jain, N., & Panwar, J. (2015). *Nano-fertilizers and their smart delivery system*. In M. Rai, C. Ribeiro, L. Mattoso, & N. Duran (Eds.). Nanotechnologies in Food and Agriculture. Springer Publication, Cham. p. 81-101. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14024-7_4

Taiz, L., & Zeiger, E. (2002). *Plant Physiology*. Sinauer Associates, Inc., Publishers, Sunderland, MA, USA. 690 pp.

Tarraf, W., Ruta, C., Tagarelli, A., De Cillis, F., & De Mastro, G. (2017). Influence of arbuscular mycorrhizae on plant growth, essential oil production and phosphorus uptake of *Salvia officinalis* L. *Industrial Crops and Products*, *102*, 144-153. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.010

Telci, I., Kacar, O., Bayram, E., Arabacı, O., Demirtaş, İ., Yılmaz, G., Özcan, I., Sönmez, C., & Göksu, E. (2011). The effect of ecological conditions on yield and quality traits of selected peppermint (*Mentha piperita* L.) clones. *Industrial Crops and Products*, *34*(1), 1193-1197. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.04.010

Thokchom, S.D., Gupta, S., & Kapoor, R. (2020). Arbuscular mycorrhiza augments essential oil composition and antioxidant properties of *Ocimum tenuiflorum* L. A popular green tea additive. *Industrial Crops and Products*, *153*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112418

Urcoviche, R.C., Gazim, Z.C., Dragunski, D.C., Barcellos, F.G., & Alberton, O. (2015). Plant growth and essential oil content of Mentha crispa inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi under different levels of phosphorus. *Industrial Crops and Products*, *67*, 103-107. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.01.016

Vafayi Rostami, S., Abbasi, R., Pirdashti, H., & Ghajar Sepanlou, M. (2019). Effect of *Piriformospora indica* and *Trichoderma harzianum* on morphological characteristics, yield and essential oil of peppermint (*Mentha piperita*) at different amount of phosphorus and irrigation. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production*, *29*(4), 37-50. (In Persian with English Summary)

Varma, A., Prasad, R., & Tuteja, N. (2018). *Mycorrhiza-Nutrient Uptake, Biocontrol, Ecorestoration*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 533 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68867-1

Willmann, M., Gerlach, N., Buer, B., Polatajko, A., Nagy, R., Koebke, E., Jansa, J., Flisch, R., & Bucher, M. (2013). Mycorrhizal phosphate uptake pathway in maize: Vital for growth and cob development on nutrient poor agricultural and greenhouse soils. *Frontiers in Plant Science*, *4*, 1-6. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00533

Wu, Q.S., Srivastava, A., & Zou, Y.N. (2013). AMF-induced tolerance to drought stress in citrus: A review. *Scientia Horticulturae*, *164*, 77–87. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.09.010

Yousefzadeh, S., Modarres, S.S.A.M., Sefidkon, F., & Ghiasy, O.M. (2016). Effect of biofertilizer, azocompost and nitrogen on oil yield and essential oil content of *Dracocephalum moldavica* L. *Iranian Journal of Horticultural Sciences*, *46*(4), 604-611. (In Persian with English Summary). https://doi.org/10.22059/ijhs.2015.56908

Zheljazkov, V.D., Cerven, V., Cantrell, C.L., Ebelhar, W.M., & Horgan, T. (2009). Effect of nitrogen, location, and harvesting stage on peppermint productivity, oil content, and oil composition. *American Society for Horticultural Science*, *44*(5), 1267-1270. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.44.5.1267

Zolfaghari, M., Nazeri, V., Sefidkon, F., & Rejali, F. (2013). Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plant growth and essential oil content and composition of *Ocimum basilicum* L. *Iranian Journal of Plant Physiology*, *3*(2), 643-650. https://doi.org/10.30495/ijpp.2013.540674

Seif Sahandi, M., Mehrafarin, A., Khalighi-Sigaroodi, F., & Sharifi, M. (2019). Changes in essential oil content and composition of peppermint (*Mentha piperita* L.) in responses to nitrogen application. *Journal of Medicinal Plants*, *18*(72), 81-97. https://doi.org/10.29252/jmp.4.72.81